

Universidad Carlos III de Madrid
Escuela Politécnica Superior
Departamento de Ingeniería Eléctrica



Proyecto Fin de Carrera:

**Detección de Carga Espacial Acumulada en
Polietileno Mediante la Técnica del Pulso
Electroacústico (PEA).**

Autor: Sebastián Fernández Rodríguez

Tutor: Juan Manuel Martínez Tarifa

Leganés, Abril 2010.

Agradecimientos

En primer lugar quisiera dar las gracias a mi tutor de proyecto, Dr. D. Juan Manuel Martínez Tarifa por su inestimable ayuda, sus consejos, su esfuerzo y su dedicación conmigo, que han permitido el desarrollo y finalización de este trabajo. También quisiera agradecerle el haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto, proporcionarme todos los medios necesarios para su elaboración y enseñarme todo lo que con él he aprendido. A Ángel, técnico de laboratorio, por haberme prestado su ayuda en mi etapa en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid. Al Técnico de Laboratorio de la Università di Bologna, Fabrizio Palmieri, que me asesoró algunas cuestiones específicas del Software del equipo PEA TechImp Systems S.r.l.

Fuera del ámbito universitario le doy las gracias a mi profesor de instituto Francisco Mangas por enseñarme a aprender y motivar todavía más mi interés por la ciencia.

A mi padre y a mi abuelo, por ser ambos ejemplo de lucha, trabajo y entrega en la vida. Mi madre y mi abuela por enseñarme a ser humilde y paciente. Y a Belén y Enrique que sin duda ellos son los responsables de que yo haya podido llegar hasta aquí.

Por último le doy las gracias a mis compañeros de universidad y a Marta, otros pilares fundamentales para sostener el camino hasta aquí.

Índice

Capítulo 1.- Introducción y objetivos.....	1
Capítulo 2.- La carga espacial.....	3
2.1.- Fenómeno de la carga espacial.....	6
2.2.- Interés del fenómeno.....	8
2.3.- Clasificación de la carga espacial.....	10
2.3.1.- Cargas extrínsecas e intrínsecas.....	10
2.3.2.- Homocarga y heterocarga.....	12
2.4.- Métodos de medida.....	15
2.4.1.- Métodos acústicos.....	16
2.4.2.- Métodos térmicos.....	20
2.4.3.- Otros métodos.....	22
2.5.- Introducción a la técnica PEA.....	22
Capítulo 3.- Metodología experimental. Introducción al equipo PEA de TechImp Systems S.r.l.....	39
3.1.- Componentes del equipo.....	40
3.2.- Conexiones del equipo.....	47
3.3.- Aspectos de software.....	48
Capítulo 4.- Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.....	59
4.1.- Ensayos de polarización.....	60
4.1.1.- Cambios de polaridad desconectando la fuente de tensión pulsante.....	60
4.1.2.- Cambios de polaridad sin desconectar la fuente de tensión pulsante.....	63
4.1.3.- Comentarios.....	65

4.2.- Ensayos de envejecimiento del aislante.....	67
4.2.1.- <i>Envejecimiento a 4 kV durante 3h.....</i>	<i>67</i>
4.2.2.- <i>Envejecimiento a 8 kV durante 3h.....</i>	<i>68</i>
4.2.3.- <i>Envejecimiento a 12 kV durante 3h.....</i>	<i>69</i>
4.2.4.- <i>Envejecimiento a 16 kV durante 3h.....</i>	<i>70</i>
4.2.5.- <i>Envejecimiento a 18 kV durante 3h.....</i>	<i>71</i>
4.2.6.- <i>Envejecimiento a 20 kV durante 3h.....</i>	<i>75</i>
4.2.7.- <i>Envejecimiento a 16 kV durante 13h.....</i>	<i>80</i>
4.2.8.- <i>Comentarios.....</i>	<i>82</i>
4.3.- Ensayos con doble muestra.....	88
4.3.1.- <i>Dos muestras sanas.....</i>	<i>90</i>
4.3.2.- <i>Muestras con daño causado por electrones.....</i>	<i>91</i>
4.3.3.- <i>Muestras con daño causado por iones.....</i>	<i>98</i>
4.3.4.- <i>Comentarios.....</i>	<i>104</i>
Capítulo 5.- Conclusiones y líneas de trabajo futuro.....	109
Capítulo 6.- Referencias Bibliográficas.....	111

Capítulo 1.- Introducción y objetivos.

Hoy en día parece difícil vivir sin el uso de sistemas eléctricos, utilizados por los usuarios bien de forma directa (electrodomésticos, herramientas, etc), o indirecta (transformadores de potencia, generadores, líneas eléctricas de transporte o distribución, etc). Para un correcto funcionamiento de cualquier dispositivo eléctrico es necesario un sistema de aislamiento adecuado. Los sistemas de aislamiento proporcionan seguridad a los usuarios y viabilidad a los dispositivos eléctricos. La vida útil de un dispositivo eléctrico depende en buena medida de la vida útil de sus aislamientos.

Los aislamientos eléctricos tienen la función de impedir el transporte de corriente eléctrica entre elementos sometidos a grandes diferencias de potencial; por ello deben soportar esfuerzos eléctricos durante su vida útil (por ejemplo un aislante de un cable de transporte en Alta Tensión). Estos esfuerzos provocan su degradación paulatina, pudiendo dar lugar a su ruptura anticipada. Por tanto es necesario investigar factores que degradan los aislamientos, y adquirir conocimientos a nivel científico mediante los cuales se puedan mejorar las cualidades de un material aislante, y favorecer y prolongar el uso del dispositivo eléctrico que protege.

Un factor clave en la degradación de un aislamiento es la carga eléctrica espacial que puede aparecer en determinadas regiones de un aislante cuando éste soporta dichos esfuerzos eléctricos, es decir, tras su puesta en servicio. La aparición de carga espacial y su comportamiento posterior, supone un serio problema en el aislante que puede comprometer su capacidad de aislamiento, pues modifica el campo eléctrico al que está sometido, pudiendo dar lugar a la ruptura dieléctrica, descargas parciales, efecto corona, calentamientos y reacciones químicas que pueden propiciar nuevas apariciones de carga espacial. Entender la forma en que aparece, su influencia en las propiedades eléctricas del material y su comportamiento, es objetivo del presente proyecto.

Para comprender la aparición y el comportamiento de la carga espacial es necesario medir y detectar esta propiedad en materiales aislantes, para que pueda ser representada y estudiada. Para medir la carga espacial en los aislantes existen muchas técnicas, que han surgido a lo largo de las tres últimas décadas. En este trabajo se van a presentar las principales técnicas de medida de carga espacial, pero centrándose en la técnica del Pulso Electroacústico (“Pulse electro-acoustic”, PEA). Esta técnica de medida de carga espacial en aislantes se emplea en el presente trabajo para realizar diversos ensayos mediante el equipo de *TechImp Systems S.r.l.* del Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid. Su principio de operación es simple y se basa en la interacción eléctrica y mecánica: la carga espacial acumulada en el aislante ejerce esfuerzos mecánicos si sobre ellas actúa un campo eléctrico pulsante; las ondas acústicas son captadas mediante un sensor

1. Introducción y objetivos.

piezoeléctrico y traducidas a señales de tensión con la información necesaria para construir un perfil de distribución de carga espacial.

Además de establecer un protocolo adecuado de medidas con el equipo PEA de *TechImp*, en este trabajo se empleará esta herramienta para hacer ensayos sobre láminas de polietileno, en las que realizarán ensayos de medida de carga acumulada tras polarización, tensión umbral de aparición de carga espacial y envejecimiento de materiales. Por último se aplicará esta técnica para el análisis de láminas de polietileno previamente envejecidas por esfuerzos eléctricos derivados de la aparición de descargas parciales.

Capítulo 2.- La Carga Espacial.

Transmitir energía eléctrica en gran cantidad es equivalente a conseguir un gran vector de Poynting (flujo de potencia eléctrica; $\vec{E} \times \vec{H}$ [W/m²], donde \vec{E} [V/m] es el campo eléctrico y \vec{H} [A/m] es el campo magnético). Esto se consigue aumentando la intensidad campo eléctrico o aumentando la intensidad de campo magnético. Aumentar el campo magnético se puede lograr mediante el uso de líneas eléctricas superconductoras (gran corriente eléctrica), sin embargo en el desarrollo práctico el uso de sistemas superconductores no ha sido satisfactorio. La alternativa consiste en el aumento de la magnitud de campo eléctrico consecuencia del aumento de la tensión en una línea de transmisión. Con el objetivo de conseguir un valor de campo eléctrico elevado mediante la Alta Tensión en sistemas de transmisión, los investigadores centran sus esfuerzos en el estudio de las propiedades de los materiales aislantes y dieléctricos. ([Khalifa, 1990]).

Para el transporte de grandes cantidades de energía eléctrica a grandes distancias actualmente son usados cables de muy alta tensión (continua o alterna) que usan aislantes de papel impregnado en aceite muy viscoso. Cables de hasta 500kV deben estar preparados para tener unos 40 años de vida útil, y como es bien conocido ésta depende del estado de sus aislamientos. Sin embargo debido al complejo y costoso proceso de fabricación de este tipo de aislamiento, aparece la idea de utilizar aislantes poliméricos. Las ventajas son reducir la relación coste/beneficio y un mantenimiento más sencillo. Además de emplear estos materiales para líneas de transmisión, el beneficio de utilizar estos aislamientos repercute también en otra apartamentada donde se podría ver incrementada su vida útil de funcionamiento consiguiendo mejorar las condiciones en sus aislamientos. ([Sanden, 1997]).

La principal característica de un material aislante es su campo de ruptura o rigidez dieléctrica (E_b), o el valor de campo eléctrico para el cual el aislante pierde total o parcialmente la capacidad de aislamiento debido a la destrucción de enlaces químicos de especies neutras. Alcanzar el campo de ruptura ($E_b = U_b/d$) es equivalente a alcanzar un valor de tensión de ruptura (U_b) mucho mayor que el valor de tensión nominal de trabajo del aislante (U_n); esto se puede producir en situaciones anómalas (transitorios, maniobras, rayo, etc), en las que se podría dar la ruptura del aislante.

2. La carga espacial.

Para estos aislamientos el campo eléctrico de servicio es aproximadamente 30 kV/mm, y aunque su campo de ruptura (unos 110 kV/mm) no se alcance, hay otros agentes que provocan su envejecimiento acelerado. Esto implica una amplia investigación en áreas relacionadas con el estudio de las características de polímeros sometidos a altas tensiones nominales que pueden degradar las propiedades de un material aislante a través de fenómenos como :

- Descargas Parciales.
- Penetración de agua.
- Radiación ionizante.
- Imperfecciones constructivas.
- Envejecimiento térmico.
- Carga espacial acumulada.

Buenos indicadores del estado de degradación de un aislante son las descargas parciales (“Partial Discharges”, PD), un fenómeno de ruptura eléctrica que, en el caso de aislantes sólidos, suceden en regiones donde existen moléculas de gas (vacuolas, cavidades, imperfecciones, etc). Se producen cuando el campo eléctrico supera un cierto valor crítico, para el cual se establece una tensión de inicio de descarga parcial (“Partial Discharge Inception Voltage”, PDIV). Este fenómeno supone superar la tensión de ruptura de la imperfección o vacuola, pero no la del material en su totalidad; por tanto, las PD no suponen la destrucción inminente del material, aunque lo degradan paulatinamente para una tensión aplicada muy inferior a la de ruptura del material.

Cuando se supera la PDIV la ionización del gas-imperfección es muy probable (en función de la aparición de un electrón libre), y eso provoca la aparición de nuevos portadores de carga (electrones e iones) consecuencia de la ruptura de los enlaces de las moléculas neutras del gas. Por tanto, tras una PD, las cargas que aparecen se distribuyen dentro de la cavidad en función de su polaridad, generando cúmulos de carga espacial. Ésta carga espacial provoca un campo eléctrico inducido en el interior del aislante (\vec{E}_q) que se superpone al campo eléctrico generado por la tensión aplicada (\vec{E}_i). En aislantes sometidos a tensiones alternas el campo eléctrico aplicado cambia su sentido en cada ciclo, lo que puede provocar que el campo total ($\vec{E}_t = \vec{E}_q + \vec{E}_i$) en el instante del cambio de polaridad se viese intensificado, ya que el campo inducido por la carga acumulada mantiene la polaridad hasta que ésta se vuelve a distribuir tras otra PD. El campo total puede alcanzar el valor de campo crítico (PDIV) para la aparición de una nueva descarga parcial (incluso para tensiones aplicadas no excesivamente grandes), y por lo tanto el número de descargas parciales por ciclo se ve afectado por la aparición de carga espacial en la masa del material. ([Díaz-Gautier, 2002]; [Bartinkas, 1979]).

2. La carga espacial.

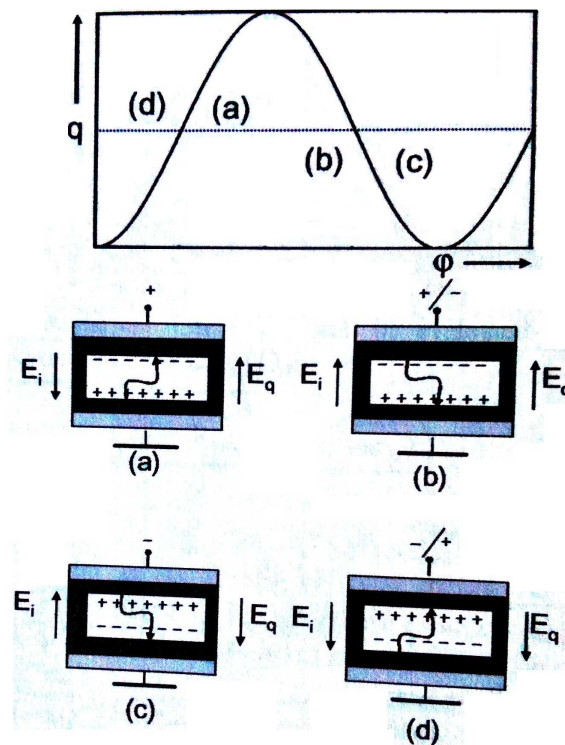


Figura 2.1.- Descargas parciales producidas en una cavidad de un dieléctrico consecuencia de la superposición del campo inducido por la carga \bar{E}_q y del campo aplicado por la tensión alterna \bar{E}_i . ([Cavallini, 2006]).

Como se ha mencionado anteriormente, las cargas eléctricas generan campo eléctrico, de modo que la aparición de carga espacial en un aislante puede llegar a intensificar su campo eléctrico y provocar la aparición de descargas parciales o incluso alcanzar y superar el nivel de campo de ruptura del propio material. Por tanto, la carga espacial puede dar lugar a un envejecimiento prematuro del material dieléctrico fomentando la aparición de electrones libres muy energéticos, reacciones químicas, ruptura de enlaces, aumento del tamaño de cavidades, etc. Es este fenómeno el que está limitando la sustitución de sistemas papel-aceite por polietileno como aislantes de cables de Alta Tensión [Mazzanti, 2003]. De ahí el interés de mejorar las prestaciones del polietileno con respecto a acumulaciones anómalas de carga espacial en su seno.

Aumentar la tensión de ruptura o incluso la de aparición de descargas parciales, se puede conseguir controlando la acumulación de la carga espacial de modo que la distribución de campo sea homogénea, o bien reduciendo la cantidad de carga acumulada. Por esta razón, son tan importantes las medidas precisas de carga acumulada en un aislante, pues permiten anticiparse al comportamiento en servicio del mismo.

2. La carga espacial.

Muchos de los factores que afectan de manera negativa las propiedades de los materiales aislantes son recíprocos, por ejemplo, como se ha visto anteriormente las descargas parciales o la ruptura parcial o total del aislante tienen cierta relación con la carga espacial que se puede acumular en el aislante. También el envejecimiento térmico o la penetración de humedad como subproducto contaminante en un aislante favorecen la aparición prematura de la carga espacial en ese aislante sometido a cierto nivel de tensión.

2.1.- Fenómeno de la carga espacial.

Los materiales aislantes pueden presentarse cargados eléctricamente de manera cuantitativa. Así puede ocurrir en un aislante sometido a un determinado estrés eléctrico. Desde una perspectiva microscópica las cargas eléctricas que aparecen son partículas cargadas eléctricamente; electrones, iones, moléculas polares, etc. A nivel macroscópico estas partículas cargadas son producto de la ionización o polarización provocada por algún mecanismo de naturaleza conocida, ya sea durante la fabricación del material o bien tras su puesta en servicio.

Cuando un material aislante es sometido a un alto nivel de tensión, la carga espacial que aparece es inducida por la inyección de portadores de carga desde los electrodos al material aislante, o debido a la polarización que se produce de las impurezas que se pueden encontrar en el interior del aislante ([Maeno,1988]). Especies cargadas de baja movilidad eléctrica o que se encuentran atrapadas en la masa del aislamiento pueden generar un campo eléctrico en esa zona localizada. Ese campo eléctrico puede provocar una mayor concentración de cargas, que a su vez puede causar un fallo prematuro en el aislamiento ([Chen, 2006]).

La aparición de carga espacial en los materiales sometidos a tensiones eléctricas puede ser consecuencia de numerosos factores. No existe un material sólido que sea preparado sin contener contaminación; los átomos o iones que componen a las impurezas alteran la regularidad estructural del material puro ideal, pudiendo dejar enlaces libres. La contaminación normal de una sustancia sólida con impurezas se conoce como *imperfección química*. Este factor es favorable para la aparición de carga espacial en el seno del sólido pues los subproductos de contaminación que aparecen en un material pueden ionizarse más fácilmente, provocar descargas parciales ([Morshuis, 2005]) y generar nuevos cúmulos de carga espacial.

Otro factor que favorece la aparición de carga espacial son los defectos estructurales en el material como la aparición de huecos causados por la degradación del mismo. Durante el proceso de fabricación de un aislante pudiera producirse que quedasen pequeñas cantidades de gas aprisionadas en el seno del material, formando cavidades de

2. La carga espacial.

formas y dimensiones muy diferentes. Estas cavidades pueden acumular carga espacial pues en ellas las descargas eléctricas son más probables ya que la tensión de ruptura normalmente es inferior a la del material ([Bartnikas, 1979]). Estos factores son considerados como *imperfecciones físicas*.

Las imperfecciones físicas y químicas son proclives a la acumulación de carga espacial. En un aislante ideal la banda de conducción está muy alejada de la banda de valencia (gap superior a 2eV), de manera que no hay electrones en aquella. La carga espacial que se pueda acumular en un aislante real lo hace en zonas de la banda de conducción debido a las imperfecciones de la estructura cristalina. En términos energéticos, dichos emplazamientos son pozos de potencial de la banda de conducción, donde portadores libres pueden quedar inmóviles mientras el campo eléctrico externo no sea muy grande como para liberarlos; la profundidad de estas “trampas de carga” llega a ser de hasta 1eV y se producen por la aparición de microvacoulas y porciones amorfas del material polimérico (“trampas físicas”) o bien por la aparición de imperfecciones químicas (grupos carbonilo, “trampas químicas”). La energía térmica también puede hacer ganar a los electrones suficiente energía como para que se desplacen de su emplazamiento de equilibrio. ([Fothergill, 2004]).

Ya sea por aplicación de una alto campo eléctrico o por energía térmica las cargas atrapadas que son liberadas se mueven en la masa del aislante hacia otras trampas, en un proceso de atrapamiento-liberación de cargas de una trampa en otra (“trapping and detrapping”). La probabilidad de liberar carga de un pozo de potencial es función de la profundidad del mismo y de la energía (térmica o eléctrica) consumida. En equilibrio térmico, el movimiento neto de portadores de una sola polaridad no será apreciable ([Mazzanti, 2003]). Si el campo eléctrico es bajo la probabilidad de liberar carga es pequeña ([Matsui, 2005]).

La degradación del material favorece la aparición de estas trampas lo que afecta al fenómeno de transporte e inyección de portadores libres modificando la movilidad de los mismos.

2. La carga espacial.

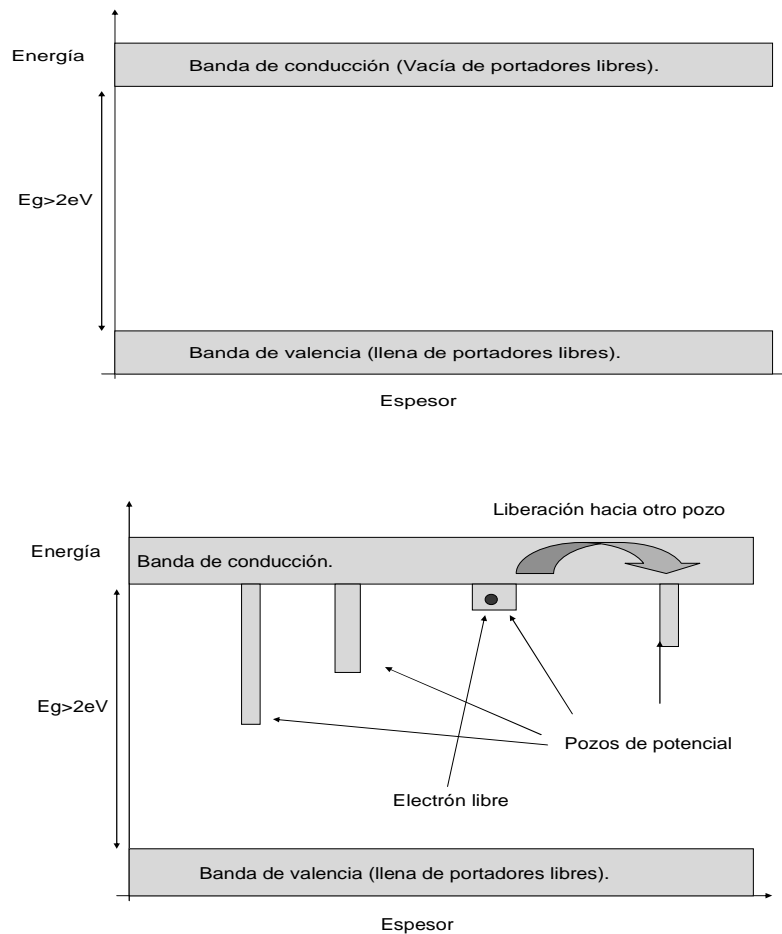


Figura 2.2.- Estructura de bandas de un aislante ideal (arriba) y real (abajo). Movimiento de carga espacial.

2.2.- Interés del fenómeno.

El fenómeno de la carga espacial es de gran interés tanto a nivel industrial como científico, pues permite:

- Estudiar la variación de las propiedades en un material debido a la aparición de carga eléctrica. Por ejemplo, los cambios en conductividad en ciertas zonas.
- Comprender los mecanismos de generación de carga espacial con el tiempo o el nivel de tensión aplicada.
- Chequear el proceso de fabricación de materiales aislantes.
- Estudiar posibles defectos en el comportamiento del aislante para altas tensiones.

2. *La carga espacial.*

La carga espacial presenta movilidad reducida en el seno del dieléctrico, pero su acumulación en una zona del material provoca distorsiones de campo eléctrico que aumentan la vulnerabilidad del mismo, ([Gallot-lavallée, 2000]). Los parámetros más importantes a considerar serán tanto la magnitud de carga acumulada como su posición en el aislamiento.

Pero aunque su movilidad sea reducida, la carga espacial sí puede presentar un comportamiento dinámico en el interior de un material. Este comportamiento dinámico responde a una fuerza aplicada, que puede ser causa del campo eléctrico aplicado externamente; también hay que recordar que éste se ve modificado por la propia carga acumulada. La movilidad de la carga espacial puede ser perjudicial para un material porque puede anticipar la ruptura eléctrica del material, y se debe a la distribución no homogénea de conductividad eléctrica en los materiales sólidos y a las características del tipo de portador de carga. En aquellas zonas de mayor conductividad será más fácil la movilidad y acumulación (“trapping and detrapping”) de los portadores de cargas eléctricas ([Matsui, 2005]).

Por tanto la acumulación y la movilidad de carga espacial en el material aislante es la principal amenaza que puede provocar la mayor distorsión del campo eléctrico. Por ejemplo, cargas opuestas muy cercanas en el aislamiento aumentan mucho el valor del campo y pueden llegar a perforar el aislamiento si se supera el campo de ruptura en esa zona. El crecimiento de los cúmulos de carga espacial puede llegar a romper el aislante, por lo que la medida de la tendencia que muestra la carga para distintos niveles de tensión o simplemente con el tiempo, es de mucho interés.

Muchos investigadores han intentado medir la distribución de carga espacial con el objetivo de poder manipular ese factor y conseguir mejorar las características de los aislamientos. La medida de carga espacial permite analizar, por ejemplo, cómo el desplazamiento de la carga en la masa del aislamiento puede provocar una ruptura. En la Figura 2.3 se muestra la movilidad de la carga acumulada en un aislante para un nivel determinado de tensión.

2. La carga espacial.

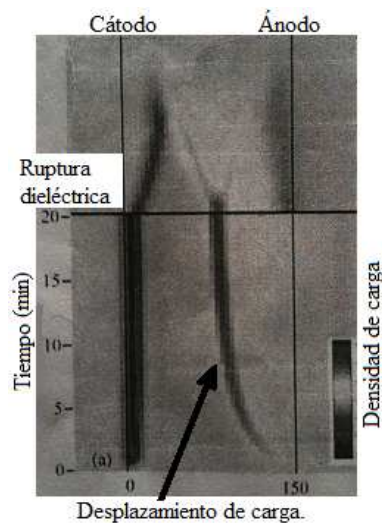


Figura 2.3.- Ruptura de un dieléctrico debido al desplazamiento de la carga ([Matsui, 2005]).

Al aparecer la ruptura dieléctrica el material aislante pierde su capacidad para impedir la circulación de corriente; en la Figura anterior se puede apreciar cómo la protección contra sobreintensidades del equipo dejó sin tensión a la muestra tras la ruptura y se produjo la recombinación de portadores libres. La medida de carga espacial permite comparar la movilidad de carga en el seno del aislante para distintos tipos de material, de forma que en el laboratorio se puedan certificar mejores prestaciones para el aislamiento que debe proteger, por ejemplo, un cable en servicio.

2.3.- Clasificación de la carga espacial.

Centrándose en el estudio de la carga que puede aparecer en un material bajo perturbaciones eléctricas, en este proyecto se estudiará la causa y el efecto de la aparición de carga espacial en el caso de materiales aislantes. Y se realizará una clasificación de las diversas formas de acumulación de la carga espacial y los factores que influyen en su presencia; para ello es conveniente familiarizarse con las distintas formas de clasificar carga acumulada.

2.3.1.- Cargas extrínsecas e intrínsecas.

En función de la zona donde se genere la carga espacial en un aislante se puede hacer una división entre cargas exteriores o extrínsecas y cargas interiores o intrínsecas.

2. La carga espacial.

Cargas extrínsecas.

Se producen en las interfaces de dos medios materiales distintos debido a las imperfecciones del acoplamiento físico entre dieléctrico sólido y el electrodo, y también entre diferentes capas de aislamiento sólido. El ejemplo más típico son cargas inyectadas que se difunden desde los electrodos hasta el aislamiento.

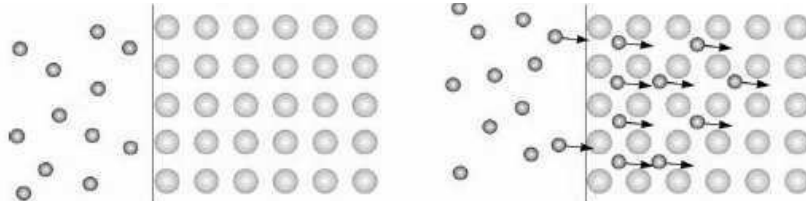


Figura 2.4.- Partículas cargadas inyectándose desde un electrodo metálico (izquierda) a un dieléctrico (derecha) ([Shackleford, 1998]).

Cargas intrínsecas.

Generadas internamente son partículas cargadas contenidas en el aislamiento, por la electrodisociación de especies neutras, por la ionización de las inclusiones sólidas, (aditivos, subproductos de fabricación, antioxidantes, etc) y por el fenómeno de atrapamiento-liberación de cargas atrapadas (“trapping and detrapping”). Típicamente son cargas atrapadas en el propio material fruto de pozos de potencial profundos. Estas cargas pasan desapercibidas en ausencia de una excitación, y son consecuencia de las imperfecciones químicas y físicas del interior del material. Una forma de descubrirlas es excitando con cierto campo eléctrico el material para polarizar las cargas o ionizar el medio. La electrodisociación de especies neutras del aislamiento, la polarización de partículas en la masa del aislamiento, el efecto térmico y la interacción con alguna forma de radiación ionizante, son factores que pueden favorecer la aparición de cargas el interior del aislamiento.

2. La carga espacial.

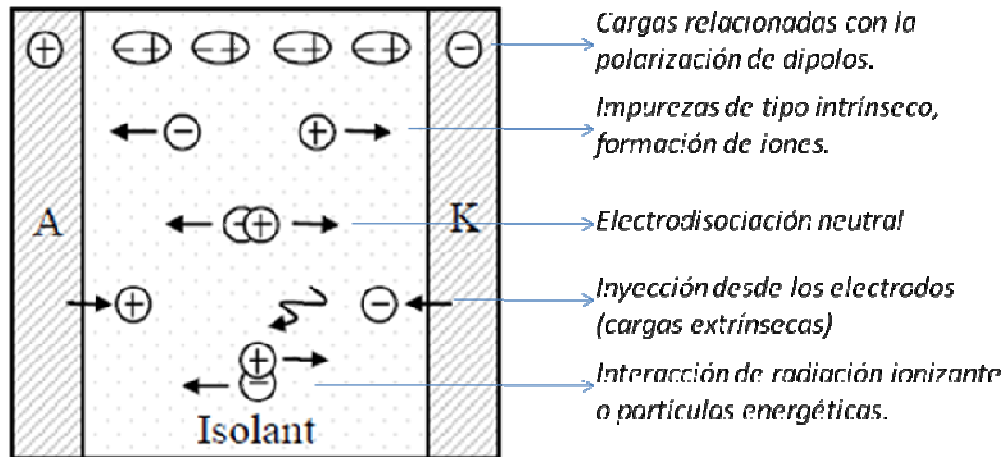


Figura 2.5.- Resumen de los tipos de cargas eléctricas que pueden aparecer en un dieléctrico que se encuentra entre dos electrodos ([Gallot-lavallée, 2000]).

2.3.2.- Homocarga y heterocarga.

La carga también se puede clasificar en función de la polaridad que tiene con respecto a los electrodos.

Homocarga.

Comparte signo con la polaridad del electrodo adyacente, de ahí su nombre. En las proximidades de los electrodos, la homocarga generalmente está relacionada con la inyección de carga procedente de aquellos (extrínseca, en ese caso). Crece su magnitud en la interfaz electrodo-dieléctrico conforme la tensión aplicada aumente sin otro límite que la tensión de ruptura del aislante. La presencia de homocarga inyectada desde los electrodos supone una reducción del campo eléctrico en los interfaces electrodo-dieléctrico, y una intensificación del campo eléctrico en el interior de la muestra.

2. La carga espacial.

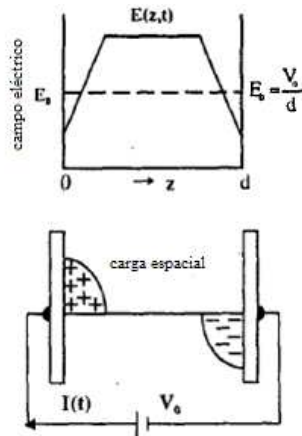


Figura 2.6.- Homocarga y campo eléctrico ([Takada, 1999]).

Heterocarga.

Tiene signo diferente con respecto al de la tensión del electrodo adyacente. En la proximidad de los electrodos, habitualmente la heterocarga proviene de cargas libres o liberadas de la masa del aislamiento. En ese caso, aparece a partir de determinados niveles de tensión, pero estará limitada en magnitud y dispersión pues es poca la carga libre que debe tener un aislamiento en su seno. No obstante tiene el efecto adverso de producir un campo eléctrico inducido que suele reforzar al aplicado en ciertas zonas de la muestra, contribuyendo a su deterioro prematuro. La aparición de heterocarga próxima a los electrodos provoca una reducción del campo eléctrico en el interior del aislante y una intensificación del campo eléctrico en los interfaces electrodo-dieléctrico.

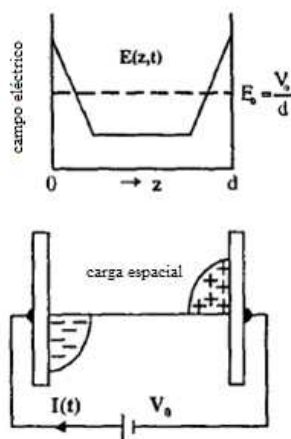


Figura 2.7.- Heterocarga y campo eléctrico ([Takada, 1999]).

2. La carga espacial.

A continuación se muestran evoluciones del campo eléctrico causados por acumulación de homocarga y heterocarga en los electrodos. La acumulación de heterocarga en la interfaz, disminuye el campo en la masa de aislamiento, pero aumenta el campo en la propia interfaz; por contra, la homocarga aumenta el campo en el cuerpo del aislante, con menor campo en la interfaz.

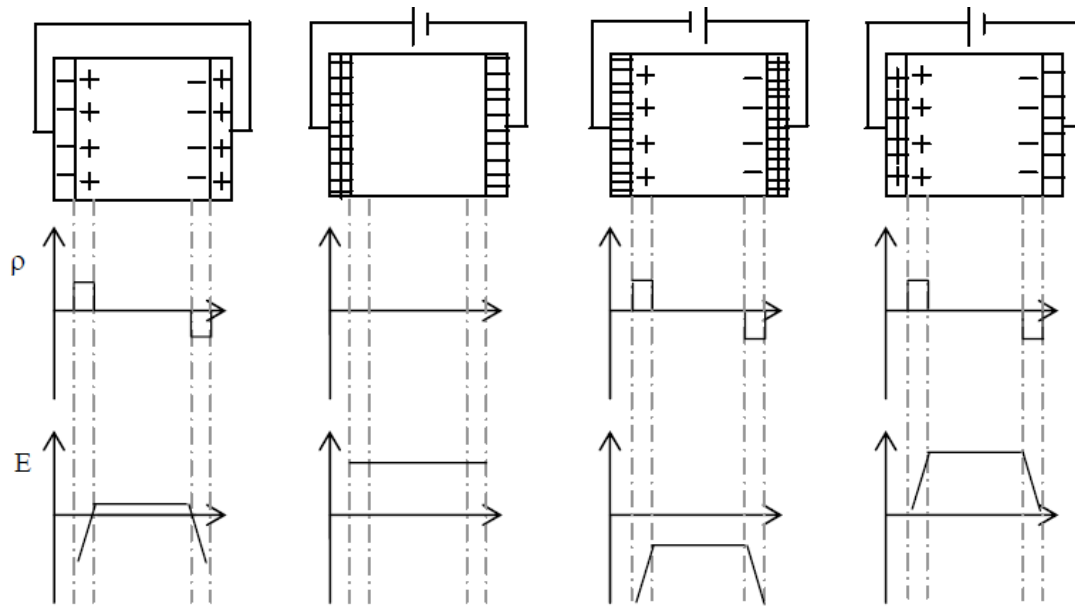


Figura 2.8.- Se puede contemplar cómo la presencia de carga eléctrica en los electrodos modifica la distribución interna del campo eléctrico y la distribución de la densidad de carga en el aislamiento ([Gallot-lavallée, 2000]).

En el caso de la masa del material, una de las razones para la aparición de heterocarga u homocarga es la presencia de imperfecciones físicas o químicas en el material (actúan como trampas de carga) o subproductos provenientes de la fabricación del material. La aparición de heterocarga/homocarga a unos niveles de tensión u otros depende de la posibilidad de extracción de cargas libres de los pozos de potencial en que suelen estar acumulados; igualmente, para un determinado nivel de tensión, las cargas libres pueden tardar en aparecer por tener baja movilidad. Una vez creada, la heterocarga/homocarga puede tardar en desaparecer, incluso tras eliminar la tensión de polarización, dependiendo de la profundidad de los pozos de potencial en que ésta quede recluida ([Mazzanti, 2005]).

2.4.- Métodos de medida.

Conocer las características eléctricas de un material aislante supone tener un conocimiento de la distribución de la densidad de carga eléctrica espacial $\rho(z,t)$, la distribución del campo eléctrico $E(z,t)$, y la distribución del potencial $V(z,t)$. Todos ellos dependen de la posición en la muestra z y del tiempo t . Mediante el uso de técnicas de medida ópticas, acústicas y térmicas, que han sido desarrolladas en las últimas décadas se pueden llevar a cabo medidas que representen la evolución de la carga espacial, el campo eléctrico y la distribución de potencial en materiales aislantes.

Estas técnicas han sido principalmente aplicadas al análisis de los fenómenos de degradación y envejecimiento, y los mecanismos implicados en la polarización y acumulación de carga espacial en materiales aislantes. El desarrollo de técnicas no destructivas permite observar directamente la evolución del campo eléctrico y la distribución de carga, sin perjudicar el material de ensayo mediante la medida de voltajes y corrientes tras someter al material a tensiones mecánicas, térmicas o eléctricas.

Una familia de técnicas utiliza la propagación de una tensión mecánica a través del material de estudio. Esta perturbación puede ser transmitida a la muestra desde el exterior como en los métodos PWP (“Pressure Wave Propagation”, propagación de onda de presión), LIPP (“Laser Induced Pressure Propagation”, propagación de presión inducida por láser). Por el contrario la perturbación mecánica puede ser generada directamente por la carga espacial de la muestra excitada por un campo eléctrico pulsante, como en el caso del método PEA (“Pulsed Electro-Acoustic”, pulso electroacústico).

Otra familia de técnicas basa el estudio en la difusión del calor en la muestra; son los métodos TS (“Thermal Step”, salto térmico), TP (“Thermal Pulse”, pulso térmico) y LIMM (“Laser Intensity Modulation Method”, método de modulación de intensidad láser).

Al ser el procesamiento del perfil de carga una labor de cálculo compleja, estos métodos generalmente se aplican a configuraciones simples tales como estructuras planas o cilíndricas (aislamientos de cables coaxiales), sometidos a Altas Tensiones DC. No obstante, en la actualidad en la *Universidad Paul Sabatier de Toulouse (Francia)* se desarrolla un método para medir carga espacial bajo la aplicación de tensiones AC basado en la técnica del pulso electroacústico PEA ([Teyssedre, 2009]).

Otros métodos menos extendidos hacen uso de fenómenos ópticos, como por ejemplo el Método Kerr, basado en la birrefringencia óptica inducida en el material cuando éste se somete a un campo eléctrico. Otro método óptico utiliza el efecto Pockels o cambio de índice de refracción del medio cuando sobre éste actúa un campo eléctrico. También

2. La carga espacial.

existen métodos complementarios, basados en la electroluminiscencia, en el análisis químico local, etc. Todos ellos están menos extendidos, razón por la cual se profundizará menos.

<i>Titulo anglo-sajón</i>	Thermal Pulse	Laser Induced Pressure Propagation	Laser Induced Modulation Method	Pulsed Electro-Acoustic	Thermal Step
<i>Apareció en</i>	1975	1977	1981	1985	1987
<i>Naturaleza de la perturbación</i>	Pulso térmico inducido por láser	Pulso de presión inducido por láser	Modulación térmica por láser	Pulso eléctrico	Nivel térmico
<i>Medida</i>	Corriente	Corriente	Corriente	Presión	Corriente
<i>Grosor de la muestra</i>	1 μ m-100 μ m	50 μ m-20mm	1 μ m -2mm	50 μ m-10mm	10 μ m-10mm
<i>Duración de la adquisición</i>	1min-100min	1 μ s-10 μ s	1min-100min	20 μ s-20s	1min-100min

Tabla 2.1.- Resumen de técnicas de detección de carga espacial. ([O. Gallot-lavallée, 2000]).

2.4.1.- Métodos acústicos.

Diversos métodos de medida de distribuciones de carga espacial en materiales aislantes están basados en la propagación de una perturbación mecánica a través del material. Los dos métodos mas comunes son el PWP y el PEA con funcionamientos muy similares pero con causas y efectos inversos.

Dado que ambos métodos PWP y PEA usan ondas elásticas, cada medida es bastante rápida; concretamente la velocidad del sonido con la que la onda atraviesa la muestra (característica de cada material) es la principal limitación en la adquisición de perfiles de carga. Esto implica tiempos de medida bastante cortos por lo que la evolución con el

2. La carga espacial.

tiempo puede ser seguida con medidas repetitivas, y se permite monitorizar la distribución de carga espacial.

El método de la propagación de la onda de presión (PWP).

En este método una onda de presión es transmitida por la muestra a la velocidad del sonido. Durante la propagación, la onda de presión mueve las cargas atrapadas en el material aislante. Esta perturbación modifica ligeramente el campo eléctrico interno, cuya variación induce una corriente en el circuito de medida externo proporcional a la variación de la distribución de carga espacial en el aislante.

De acuerdo con la naturaleza de la generación de ondas acústicas el PWP puede clasificarse en dos tipos:

- 1) PIPWP (Piezoelectric Induced Pressure Wave Propagation) que es la propagación de la onda de presión inducida por la aplicación de tensión a un piezoeléctrico.
- 2) LIPP (Laser Induced Pressure Propagation) propagación de la onda de presión inducida por láser.

Ambos tienen el mismo principio de medida. Con el método PIPWP aplicamos un pulso de tensión a un piezoeléctrico, lo que da como resultado una perturbación mecánica sobre la muestra (alimentada, generalmente, en corriente continua); en el método LIPP, un láser es el que incide transitoriamente sobre la superficie del material provocando la onda de presión. Cuando la onda de presión incide sobre la carga espacial distribuida en el dieléctrico, provoca un ligero desplazamiento de la carga de su posición. Ese movimiento genera un desplazamiento de corriente eléctrica. Un tratamiento adecuado de esa señal de corriente eléctrica puede establecer una distribución de carga espacial. A través de un algoritmo adecuado se puede obtener la distribución, teniendo en consideración la dispersión y atenuación de las ondas de presión con el fin de mejorar la resolución de la señal y la posterior determinación de distribución de carga ([Takada, 1999]).

2. La carga espacial.

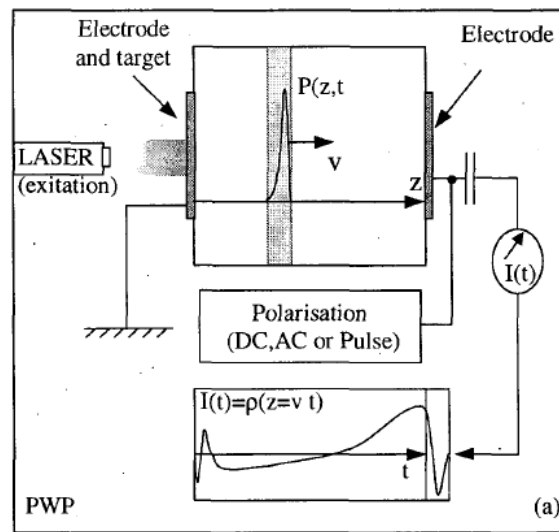


Figura 2.9.- Principio del método LIPP ([Alquié, 1999]).

El método del pulso electroacústico (PEA).

Este método, que será analizado con mayor detalle en el presente proyecto, utiliza un principio físico muy similar al método PWP, pero las causas y los efectos son inversos. La muestra contenida entre dos electrodos y sometida a una Alta Tensión DC, es sometida a una perturbación, que es un pulso de tensión que modifica ligeramente el campo eléctrico interno; esto lleva a la interacción electromagnética a actuar sobre las cargas y producir ligeros desplazamientos. Así se crea una onda elástica proporcional a la carga y propagada por el material hasta llegar a un transductor piezoeléctrico donde puede ser transformada en una señal de tensión; por tanto la señal detectada es una onda de presión ([Takada, 1999]). Al igual que en el método PWP, un algoritmo es usado para generar la señal de distribución de carga en función de la señal de tensión generada por el transductor. Por ser el método de medición empleado en este trabajo, se detallarán estos algoritmos de trabajo más adelante.

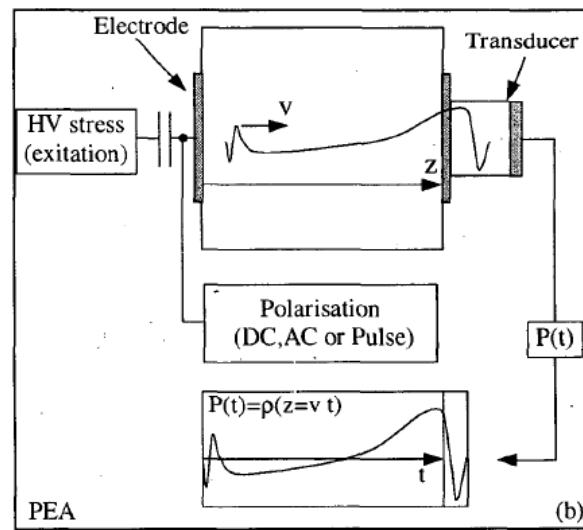


Figura 2.10.- Principio del método PEA ([Alquié, 1999]).

Comparación entre las técnicas PWP y PEA.

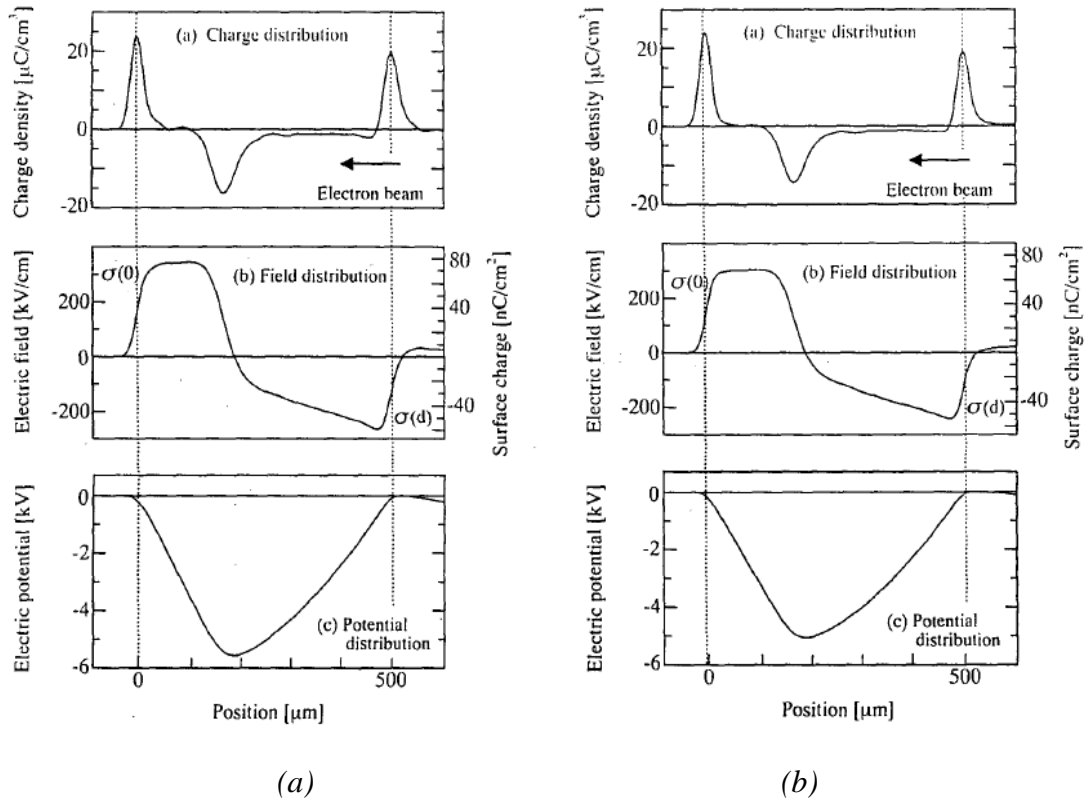
En ambas técnicas es necesario realizar el proceso de convolución/deconvolución matemática para las ondas acústicas generadas y detectadas (ver sección 2.5) con el objetivo de obtener la carga frente al espesor de la muestra.

Los grosores típicos en las muestras de cada uno de los métodos son similares. La resolución relativa en ambos métodos está en torno al 2 - 5%.

En el método PEA existe seguridad para el circuito de detección, pues el circuito de AT y la instrumentación electrónica de medida están completamente separados. La señal de salida está aislada y es difícil se vea afectada por el ruido eléctrico en el sistema de detección. Por tanto, el sistema de detección no se puede dañar aunque suceda una ruptura eléctrica prematura en la muestra bajo análisis.

En el método PWP no sucede lo mismo pues el circuito de AT y la señal detectada están separados sólo por un condensador de acoplamiento. Esto provoca que la señal de salida pueda ser afectada fácilmente por las descargas o el ruido eléctrico. Es costoso y complejo elaborar un sistema de aislamiento para el circuito de detección. El peor caso es el de ruptura eléctrica en el que el sistema de instrumentación se puede ver dañado, por ello resulta crítico el sistema de protección del circuito detección.

2. La carga espacial.



$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \Rightarrow E(x') = \frac{1}{\epsilon} \int_{-\infty}^{x'} \rho(x) \cdot dx$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \Rightarrow V(x') = -\int_{-\infty}^{x'} E(x) \cdot dx$$

Figura 2.11.- Resultados de medidas de carga, campo y potencial con los métodos (a) PEA y (b) PWP, y ecuaciones que las relacionan ([Takada, 1999]).

2.4.2.- Métodos térmicos.

Se basan en la observación dinámica de la carga bajo la perturbación aplicada de un estrés térmico. La difusión del calor es un proceso relativamente lento, y la muestra debe alcanzar el equilibrio térmico entre dos mediciones sucesivas, lo que implica que estos métodos, por lo general, son lentos.

En el método de modulación térmica por láser (LIMM) las dos caras de una muestra delgada de un material están expuestas a un cambio temporal de forma sinusoidal de radiación láser modulada (generalmente luz roja), que es absorbida por los electrodos. La variación sinusoidal resultante de la temperatura de los electrodos genera fluctuaciones de temperatura en todo el volumen de la muestra que interactúan con la carga espacial para generar una corriente piroeléctrica. Esta corriente está determinada

2. *La carga espacial.*

por la frecuencia de modulación y la distribución de carga espacial. Se toman medidas en varias frecuencias, y un proceso de deconvolución es necesario para extraer la distribución con los datos. La resolución de este método es mucho mayor en la superficie de la muestra que en la masa interior, donde la dispersión y disipación de las ondas de calor en el tránsito de la muestra degradan la precisión del instrumento. El máximo espesor de la muestra está determinado por el rango de frecuencias aplicadas en el cambio de temperatura que está entre los 10 mHz y 1MHz, en muestras de polímeros con un grosor desde 1μm a 2mm.

En el método de salto térmico (TS) ambos electrodos están inicialmente en contacto con un disipador de calor a una temperatura cercana a -10°C. Una fuente de calor normalmente a 20°C entra en contacto con uno de los electrodos, y el perfil de temperatura a través de la muestra comienza a evolucionar hasta alcanzar el equilibrio. La expansión térmica resultante en la muestra provoca un flujo de corriente entre los electrodos. La deconvolución utilizando el análisis de Fourier permite la extracción de la distribución de carga espacial con los datos de flujo de corriente. Esta técnica es particularmente apropiada para muestras más gruesas, con un espesor entre 10μm y 10mm, ya que la cantidad de calor necesaria para provocar desplazamiento de carga es grande y los datos pueden ser recogidos hasta que la distribución de temperatura en la muestra se ha equilibrado. Sin embargo la resolución espacial es muy inferior a la del método LIMM. ([Fleming, 1998]).

La estimulación térmica de corriente TSC (“Thermal Stimulation Current”). Es un método complementario ya que puede ser combinado con consecutivas medidas de distribución de carga espacial ya sea utilizando métodos PWP, PEA o TS. En el TSC la corriente externa es medida mientras una rampa térmica es aplicada en la muestra. Esta técnica modifica el estado eléctrico de la muestra, pero aporta mucha información sobre la energía de activación y localización de los portadores de cargas ([Alquié, 1999]).

Otro método es el método TP (“Thermal Pulse”, pulso térmico), consiste en irradiar una superficie de la muestra con un pulso de luz, que provoca una variación repentina de la temperatura. La deformación no homogénea del sistema asociada a la difusión del calor en la muestra, crea una señal que puede ser relacionada con la carga espacial mediante el uso de una ecuación matemática ([Alquié, 1999]).

2.4.3.- Otros métodos.

Electroluminiscencia.

Las medidas de electroluminiscencia están asociadas con la energía de transferencia desde un sistema eléctrico a una emisión de fotones cuando existe un proceso de ionización. Esta consecuencia ha sido ampliamente estudiada en los aisladores que generalmente deberán ser transparentes, y ofrece mucha información sobre el material y las cargas acumuladas. La electroluminiscencia normalmente ocurre como una indicación de un proceso previo a la ruptura en los aislantes, y está vinculada a descargas parciales de gran magnitud. Es una ayuda para comprender la forma en que ocurre la degradación de una muestra. Esta técnica es de particular interés en configuraciones de alto valor de campo en el que es bien conocido que la transferencia de carga espacial juega un papel importante ([Alquié, 1999]).

Análisis químico local.

La relación entre altas tensiones y los cambios estructurales químicos asociados al envejecimiento de los materiales ha sido investigada mediante el uso de técnicas de análisis químico local, generalmente un método bastante lento. Se ha demostrado que los cambios químicos observados asociados al tiempo, al entorno, o al estrés eléctrico podrían explicar el comportamiento de los materiales. El hecho de que la aparición de carga espacial esté relacionada con procesos de ruptura y por tanto con la aparición de especies químicas diferentes, muestra el gran interés del estudio de la acumulación de carga en aislantes ([Alquié, 1999]).

2.5.- Introducción a la técnica PEA.

Historia de la técnica PEA.

La técnica PEA nace en la década de los ochenta, cuando los doctores Takada, Maeno (Japón) y Cook (E.E.U.U.) investigan para desarrollar una técnica que permita describir el campo eléctrico en la interfaz entre un electrodo y un dieléctrico utilizando técnicas electroacústicas. En 1985 ya es una técnica complementaria de otras para la medición de la densidad de carga espacial.

2. La carga espacial.

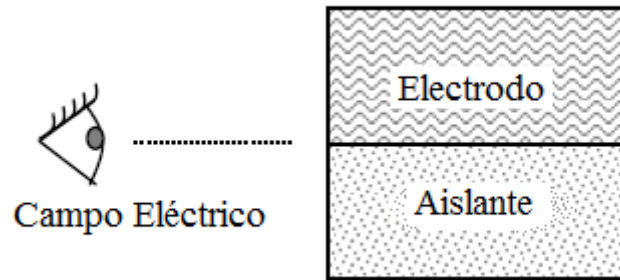


Figura 2.12.- Observar el campo eléctrico entre electrodo y aislante. ([Gallot-lavallée, 2000]).

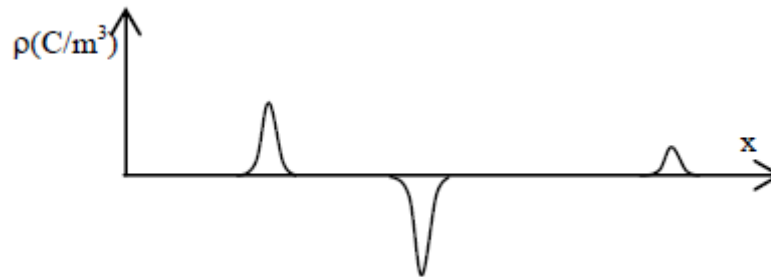


Figura 2.13.- Ejemplo de perfil de carga espacial. ([Gallot-lavallée, 2000]).

No será hasta 1988 cuando se convierta en una técnica competitiva gracias a la aparición del sensor piezoeléctrico PVDF (polifluoruro de vinilideno) -en sustitución del piezoeléctrico PZT- que siendo más delgado y flexible permite una medición más directa.

A partir de 1990 esta técnica maduró y fue habitualmente usada en laboratorios y lugares industriales. La *propagación de ondas de presión*, y los *métodos térmicos* se convirtieron populares en Europa y Norte-América, sin embargo la *técnica del pulso electroacústico* fue preferida en Japón. Actualmente el método PEA está siendo implantado con más frecuencia en laboratorios de investigación europeos ([Teyssedre, 2004]).

Introducción teórica.

La técnica PEA consiste en detectar ondas acústicas generadas por el desplazamiento de las cargas espaciales que se encuentran en un material. El material es sometido a una alta tensión de continua (o alterna sinusoidal en las versiones más actuales) que polariza el material para favorecer la aparición de la carga espacial. Una serie de pulsos de baja tensión aplicados a la muestra son superpuestos a la alta tensión y provocan ligeros desplazamientos en las cargas. Esta perturbación de forma y evolución variable en el tiempo, pero de naturaleza conocida, genera un campo eléctrico inducido y produce en cada carga existente una fuerza de Coulomb responsable del desplazamiento de la carga. Su principio es relativamente simple de comprender y su uso es muy flexible.

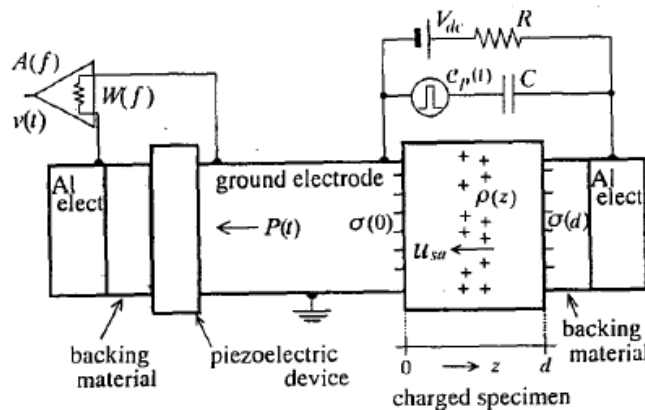
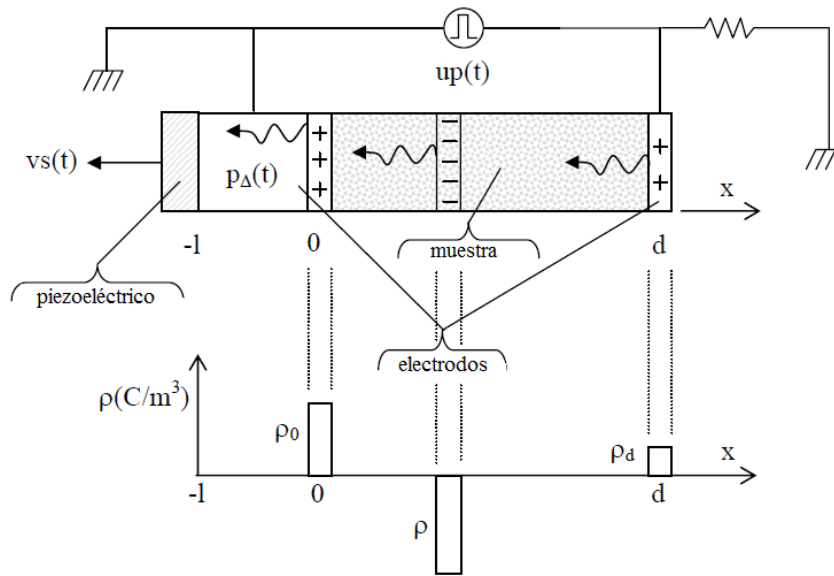


Figura 2.14.- Esquema del modelo físico del método PEA ([Takada, 1999]).

Las ondas acústicas son generadas por el intercambio de cantidad de movimiento entre cargas eléctricas, unidas a los átomos del dieléctrico y el medio neutro. Esa onda acústica es detectada por un sensor piezoeléctrico y registrada como una señal de tensión variable con el tiempo que sirve para proporcionar las bases para la reconstrucción de la distribución unidimensional de la densidad de la carga espacial.

Se considera una muestra situada entre dos electrodos, de espesor d y con una acumulación de carga negativa ρ a una distancia x en su espesor. Esta acumulación de carga influye en los interfaces de los electrodos para conseguir la neutralidad del aislante; por ello aparecen ρ_0 y ρ_d proporcionales a la distancia que los separa de la posición del paquete de carga intermedio, como se muestra en la Figura 2.15.

2. La carga espacial.



Donde: $\rho_0 = \frac{-x}{d} \cdot \rho$; $\rho_d = \frac{x-d}{d} \cdot \rho$

Figura 2.15.- Distribución de carga en una muestra. ([Gallot-lavallée, 2000]).

La aplicación de un pulso de tensión $u_p(t)$ en esta situación provoca un campo eléctrico ($\vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot V$). Este campo provoca fuerzas electrostáticas en las cargas por efecto coulomb ($\vec{F} = q \cdot \vec{E}$), que provocan un desplazamiento de las cargas sobre la línea de acción del campo. Este ligero desplazamiento provoca vibraciones mecánicas que generan ondas acústicas de presión proporcionales a la densidad de carga espacial y se extienden por la muestra a la velocidad del sonido característica en el material.

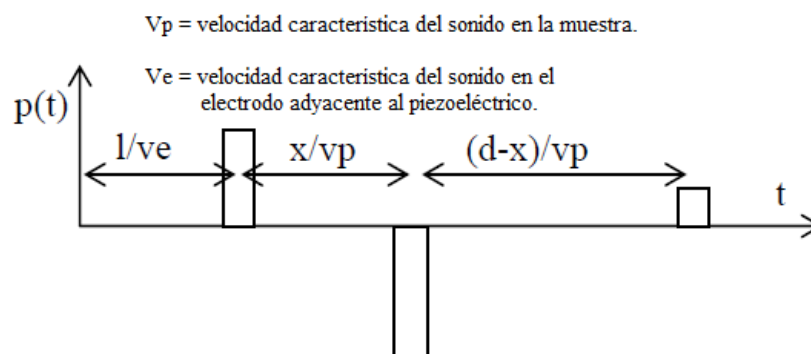


Figura 2.16.- Presión detectada por la distribución de carga espacial en una muestra de grosor d. ([Gallot-lavallée, 2000]).

2. La carga espacial.

Estas variaciones de presión son captadas por un transductor piezoeléctrico, y consecuencia de éstas, es generada una señal de tensión $V_s(t)$ que caracteriza a la onda de presión. La información de la distribución de carga puede ser obtenida mediante las técnicas de tratamiento de señal mostradas seguidamente que emplean los datos de una señal de referencia.

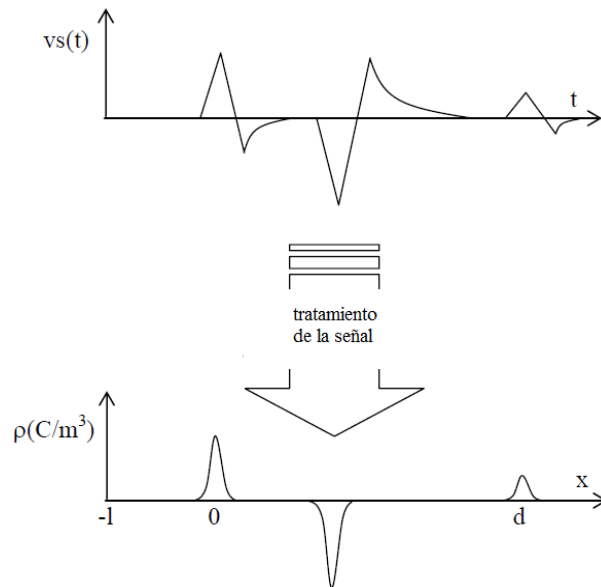


Figura 2.17.- Perfil de tensión generada por el piezoeléctrico y perfil de distribución de la densidad de carga fruto del tratamiento de esa señal de tensión generada. ([Gallot-lavallée, 2000]).

Esta señal de referencia $V_{s1}(t)$, aporta una información cuantitativa para la calibración, y también una información cualitativa que refleja las características del sensor.

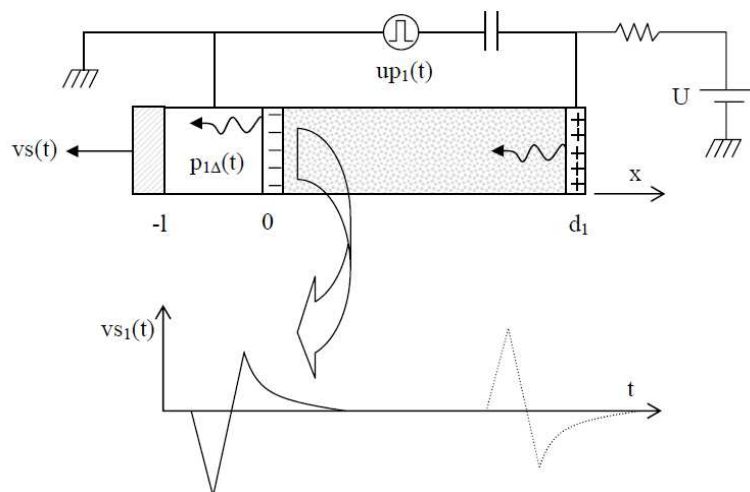


Figura 2.18.- Señal de referencia. ([Gallot-lavallée, 2000]).

2. La carga espacial.

Desarrollo matemático para la obtención del perfil de carga.

Para obtener el algoritmo que permite obtener el perfil de carga espacial del material del ensayo, basta con recordar la Ley de Coulomb y el concepto físico de Campo Eléctrico.

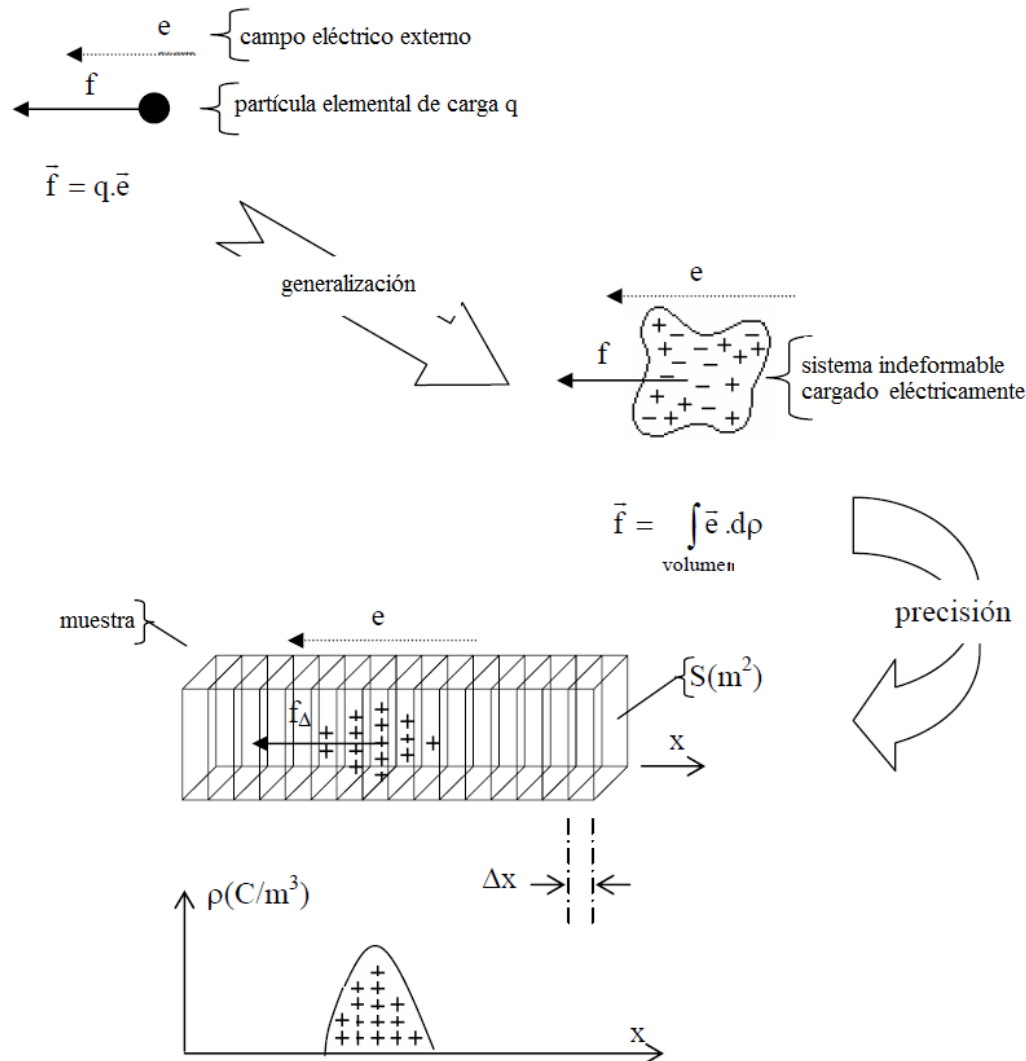


Figura 2.19.- Principios básicos de funcionamiento de la técnica PEA. ([Gallot-lavallée, 2000]).

En este modelo cada capa Δx con carga contiene un sistema indeformable y homogéneo de carga, que impulsado por una fuerza transitoria, se desplaza de su posición original, volviendo a la misma a través de un balance de interacciones elástico. Como varía ligeramente la posición de la carga variará también la distribución del campo, pero se considera insignificante esta variación transitoria del campo. Es una de las hipótesis planteadas en el desarrollo del método.

2. La carga espacial.

La ecuación (1) representa la componente dinámica de la fuerza ejercida por la aplicación transitoria de un campo eléctrico, función de la posición x en el espesor de la muestra y del tiempo t .

$$f = q \cdot E$$

$$q = \rho(x) \cdot V$$

$$V = \Delta x \cdot S$$

$$E = e(t)$$

Con todo esto se puede obtener:

$$f(x, t) = \rho(x) \cdot \Delta x \cdot S \cdot e(t) \quad (1)$$

Donde:

$f(x, t)$	componente dinámica de la fuerza
$\rho(x)$	densidad de carga
Δx	incremental del espesor de la muestra correspondido con el eje x
S	área de la muestra y de cada incremento de espesor Δx
$e(t)$	campo eléctrico transitorio aplicado en la muestra
V	volumen

Los dipolos que surgen en la polarización no pueden ser observados por el método PEA pues la fuerza resultante que provoca el campo eléctrico es nula ya que el dipolo tiene la misma parte de carga negativa que positiva.

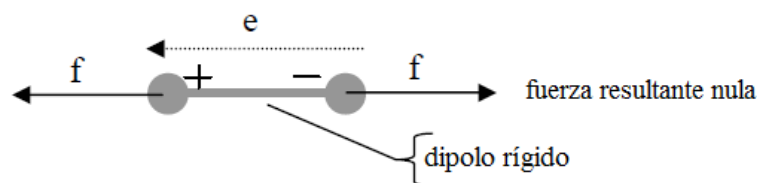


Figura 2.20.- La resultante de las fuerzas electrostáticas en dipolos es cero. ([Gallot-lavallée, 2000]).

2. La carga espacial.

Para deducir la presión en el detector piezoeléctrico se tiene en cuenta otra de las hipótesis planteadas para el desarrollo del método: *la onda se va a propagar sin dispersión y sin disipación a la velocidad característica del sonido en el material.*

Tal y como se mostró en la Figura 2.16, v_p es la velocidad característica del sonido en la muestra mientras que v_e es la velocidad del sonido característica en el electrodo inferior al que llega la perturbación mecánica.

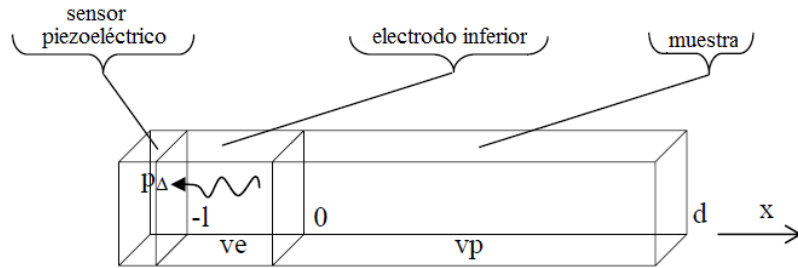


Figura 2.21.- Sensor, Electrodo inferior y muestra. Con sus respectivas velocidades del sonido características. ([Gallot-lavallée, 2000]).

El incremento de presión aplicado sobre Δx es: $p_{\Delta} = \frac{f(x,t)}{S}$, sustituyendo en la ecuación (1) se obtiene:

$$p_{\Delta}(x,t) = e\left(t - \frac{l}{v_e} - \frac{x}{v_p}\right) \cdot \rho(x) \cdot \Delta x \quad (2)$$

La ecuación (2) representa la presión ejercida por un desplazamiento de una masa cargada perteneciente a un incremental (Δx) del espesor de la muestra cargado eléctricamente con una densidad de carga $\rho(x)$ en la posición x del grosor. Esta expresión de la presión contiene el retraso temporal debido al tiempo que tarda la onda acústica en atravesar la muestra y el electrodo inferior adyacente al piezoeléctrico, es decir, el tiempo entre la producción de la onda y la detección. De ahí la expresión para

el campo eléctrico $e\left(t - \frac{l}{v_e} - \frac{x}{v_p}\right)$, donde:

$\frac{l}{v_e}$ representa el tiempo que tarda en atravesar el electrodo adyacente al piezoeléctrico de longitud l .

2. La carga espacial.

$\frac{x}{v_p}$ representa el tiempo que tarda en atravesar la muestra desde una posición a x distancia.

Para conocer la presión total ejercida por todo el conjunto de capas incrementales del grosor de la muestra $p(t)$, basta con reducir los incrementales a diferenciales y realizar la integral de todo el conjunto de elementos diferenciales situados en el espesor.

$$p(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_{\Delta}(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e\left(t - \frac{l}{v_e} - \frac{x}{v_p}\right) \cdot \rho(x) \cdot dx \quad (3)$$

El campo eléctrico es insignificante fuera del espesor de dieléctrico, por lo que sólo se considera en el cálculo con $x \in [0, d]$, igual que sucede en un condensador.

Se realiza un cambio de variable:

$$\tau = \frac{x}{v_p} \Rightarrow \begin{cases} \rho(x) = \rho(\tau \cdot v_p) = r(\tau) \\ \Delta x = \Delta \tau \cdot v_p \Leftrightarrow dx = d\tau \cdot v_p \end{cases}$$

El término τ representa el tiempo que tarda la presión en recorrer la distancia x del espesor de la muestra a la velocidad característica del sonido en el material dieléctrico. Viene a determinar una posición característica dentro del espesor de la muestra.

La presión tras el cambio de variable queda como:

$$p(t) = v_p \int_{-\infty}^{+\infty} e\left(t - \frac{l}{v_e} - \tau\right) \cdot r(\tau) \cdot d\tau \quad (4)$$

En la ecuación (4) la integral es la convolución de $e\left(t - \frac{l}{v_e} - \tau\right)$ y $r(\tau)$.

$$\int r(\tau) \cdot e(t - \tau) = (r * e)(t) \quad (5)$$

Por tanto, se puede aplicar la transformada Laplace sobre (4), teniendo en cuenta que:

$$L\{r * e\} = L\{r\} \cdot L\{e\};$$

es decir, la transformada de una convolución de dos funciones, es el producto de las transformadas de cada función.

2. La carga espacial.

Tras la transformación de Laplace las variables quedan en función de la frecuencia s , junto a un término exponencial complejo debido al retraso temporal $\frac{l}{v_e}$. La demostración es la siguiente:

$$\begin{aligned} P(s) &= L[p(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} [v_p \int_{-\infty}^{+\infty} e(t - \frac{l}{v_e} - \tau) \cdot r(\tau) \cdot d\tau] \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot t \cdot j) \cdot dt = \\ &= v_p \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(\tau) \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot \tau \cdot j) \cdot d\tau \cdot e(t - \frac{l}{v_e} - \tau) \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot (t - \tau) \cdot j) \cdot dt \end{aligned}$$

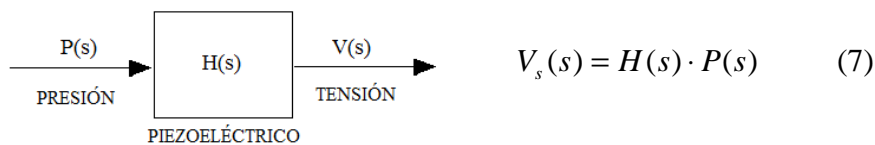
Con : $t' = t - \tau \Rightarrow dt = dt'$;

$$\begin{aligned} P(s) &= v_p \int_{-\infty}^{+\infty} r(\tau) \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot \tau \cdot j) \cdot d\tau \int_{-\infty}^{+\infty} e(t' - \frac{l}{v_e}) \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot t' \cdot j) \cdot dt' = \\ &= v_p \cdot R(s) \int_{-\infty}^{+\infty} e(t' - \frac{l}{v_e}) \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot (t' - \frac{l}{v_e}) \cdot j) \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot \frac{l}{v_e} \cdot j) \cdot dt' = \\ &= v_p \cdot R(s) \cdot E(s) \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot \frac{l}{v_e} \cdot j) \end{aligned}$$

Por tanto, la expresión para la presión ejercida en el dominio de la frecuencia pasa a ser:

$$P(s) = L[p(t)] = v_p \cdot R(s) \cdot E(s) \cdot \exp(-2 \cdot \pi \cdot s \cdot \frac{l}{v_e} \cdot j) \quad (6)$$

La salida del transductor piezoeléctrico es $V_s(t)$, su entrada es $p(t)$ y su función de transferencia $h(t)$. Considerando la respuesta en frecuencia del transductor, la relación entre las señales de entrada y salida se relacionan en el dominio de la frecuencia como sigue:



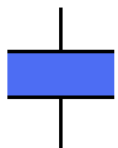
En la ecuación (7) $H(s)$ es la función de transferencia característica del sensor piezoeléctrico en el dominio de la frecuencia. Como el objetivo es conocer el perfil de carga mediante la tensión de salida del sensor, es necesario conocer de la ecuación el

2. La carga espacial.

término de la función de transferencia $H(s)$. La solución se basa en obtener una señal de referencia para despejar esa incógnita.

Señal de referencia.

En un condensador el dieléctrico se encuentra en el interior de dos electrodos. En un dieléctrico sin carga previa aplicamos una tensión continua entre los electrodos para polarizar y descubrir carga eléctrica en el aislante. Se puede deducir la densidad superficial de carga en los electrodos:



$$\left. \begin{array}{l} C = \frac{Q}{V} \\ C = \epsilon_1 \cdot \frac{S}{d_1} \\ \sigma_1 = \frac{Q}{S} \end{array} \right\} \Rightarrow Q = C \cdot V = \epsilon_1 \cdot \frac{S}{d_1} \cdot V \Rightarrow \sigma_1 = \epsilon_1 \cdot \frac{V}{d_1} \quad (8)$$

En la ecuación (8) se obtiene una aproximación ideal a lo que debería ser la densidad superficial de carga en una de las superficies de un electrodo, que se va a considerar el electrodo adyacente al sensor, responsable de aplicar una presión $p_1(t)$ sobre el mismo. Por lo tanto, utilizando las ecuaciones (2) y (8):

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \rho(0) \cdot \Delta x \Rightarrow p_1(t) = \sigma_1 \cdot e\left(t - \frac{l}{v_e}\right) \\ \Rightarrow L[p_1(t)] &= P_1(s) = \sigma_1 \cdot E(s) \cdot \exp\left(-2\pi \cdot s \cdot \frac{l}{v_e} \cdot j\right) \end{aligned} \quad (9)$$

La ecuación (9) representa la presión $P_1(s)$ correspondiente a la señal que se toma como referencia. Determina la onda de presión que se genera en el electrodo adyacente al sensor. Las propiedades del sensor son siempre las mismas, por lo que $H(s)$ no debe cambiar, y entonces, de la señal de referencia se obtiene una tensión:

$$V_{s1}(s) = H(s) \cdot P_1(s) \quad (10)$$

A continuación se muestra de forma detallada el desarrollo matemático para obtener la densidad de carga en el espacio de Laplace:

2. La carga espacial.

$$\text{de (6): } R(s) = \frac{P(s)}{v_p \cdot E(s) \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot \frac{l}{v_e} \cdot j)} \quad : (6')$$

$$\text{de (7): } P(s) = \frac{V_s(s)}{H(s)} \quad : (7')$$

$$\text{de (10): } H(s) = \frac{V_{s1}(s)}{P_1(s)} \quad : (10')$$

$$\text{con (9)y(10'): } H(s) = \frac{V_{s1}(s)}{\sigma_1 \cdot E(s) \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot \frac{l}{v_e} \cdot j)} \quad : (9')$$

$$\text{con (9')y(7'): } P(s) = \frac{V_s}{V_{s1}} \cdot \sigma_1 \cdot E(s) \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot \frac{l}{v_e} \cdot j) \quad : (8')$$

$$\text{con (8')y(6'): } R(s) = \frac{V_s}{V_{s1}} \cdot \frac{\sigma_1}{v_p} \cdot \frac{E(s) \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot \frac{l}{v_e} \cdot j)}{E(s) \cdot \exp(-2\pi \cdot s \cdot \frac{l}{v_e} \cdot j)} \quad : (11')$$

Por tanto, manipulando las ecuaciones (6), (9) y (10) se obtiene:

$$R(s) = \frac{\sigma_1}{v_p} \cdot \frac{V_s(s)}{V_{s1}(s)} \quad (11)$$

En la ecuación (11) ya se representa la densidad de carga en el espacio de Laplace, y bastaría con realizar la transformación inversa para obtener la densidad de carga $\rho(x)$.

Por lo tanto para obtener un perfil de carga es necesario realizar dos tareas:

- 1) Medir la tensión de salida en función del tiempo $V_s(t)$ y transformarla en $V_s(s)$.
- 2) Obtener la señal de referencia para tener $V_{s1}(t)$ y transformarla en $V_{s1}(s)$
Obtener σ_1 con las ecuaciones básicas del condensador con los datos para ello proporcionados de nivel de tensión, grosor o tamaño del dieléctrico, y valor de la permitividad o constante dieléctrica para alcanzar la ecuación (8).

2. La carga espacial.

Se necesita conocer el perfil de carga $\rho(x)$, a través de (11) donde se obtiene $R(s)$. A través de la transformada inversa de Laplace y considerando el cambio de variable

realizado en (4): $\tau = \frac{x}{v_p}$:

$$\rho(x) \Leftrightarrow \rho(\tau \cdot v_p) = r(\tau) = L^{-1}[R(s)] = L^{-1}\left[\frac{\sigma_1}{v_p} \cdot \frac{V_s(s)}{V_1(s)}\right] = L^{-1}\left[\frac{\varepsilon_1 \cdot V}{v_p \cdot d_1} \cdot \frac{V_s(s)}{V_1(s)}\right] \quad (12)$$

La ecuación (12) representa el modelo matemático del método PEA para la obtención del perfil de carga espacial.

Deconvolución y tratamiento de la señal de referencia.

Como se ha visto para obtener la expresión de la distribución de carga es necesario plantear el producto de dos funciones que pertenecen al espacio de Laplace, es decir, la expresión de una convolución como muestra la ecuación (4). La convolución modeliza matemáticamente el proceso de formación de una señal a partir de otras que han sufrido cierta degradación debida a diversos factores como ruido o la saturación del equipo piezoeléctrico-amplificador debido al límite de resolución del dispositivo.

La *señal de referencia* $P_1(s)$ debe representar un perfil de carga ideal sin carga intermedia que se registra en el dispositivo, que si bien resulta difícil de adquirir se puede conseguir mediante procedimientos de calibrado o calcular teóricamente.

Teóricamente el perfil ideal para la señal de referencia debe aproximarse a una función delta de Dirac, esto es, un pulso instantáneo de amplitud infinita que debiera ser causa de los pulsos acústicos provocados por la carga en uno de los electrodos, y como se ha dicho sin carga intrínseca.

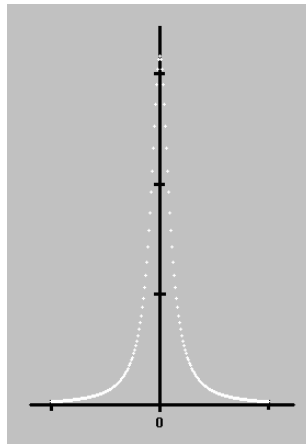
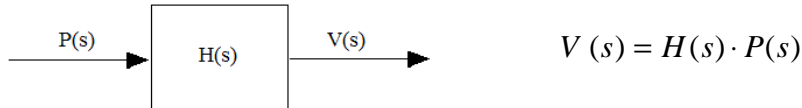


Figura 2.22.- Función delta de Dirac.

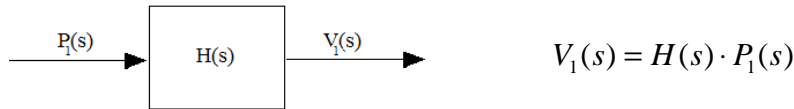
2. La carga espacial.

El objetivo de obtener esta señal de referencia es despejar la incógnita de la función de transferencia del equipo. Para explicarlo se muestra el siguiente procedimiento continuando el análisis por teoría de señales iniciado en la ecuación (7). En el transductor piezoeléctrico, la salida de tensión para cualquier señal de pulso será:



Con $H(s)$ como función de transferencia del propio transductor.

Para la señal de referencia $P_1(s)$ sucede lo mismo:



Para conocer $H(s)$ convendría utilizar una señal de referencia donde $P_1(s) = 1$, de este modo $V_1(s) = H(s)$. Para que la transformada de Laplace de una función sea 1, ésta función debe de ser un pulso instantáneo ideal, es decir una función delta de Dirac (duración temporal tiende a cero, amplitud a infinito).

Éste es el significado de la señal de referencia: se debe obtener una señal lo más parecida a un pulso instantáneo para poder conocer la función de transferencia del sistema, y poder reflejar las características del transductor:

$$V_1(s) = H(s) ; \text{ si } P_1(s) = 1 \Rightarrow V(s) = V_1(s) \cdot P(s) \Rightarrow P(s) = \frac{V(s)}{V_1(s)}$$

Pero obtener esa señal de referencia parece imposible con cualquier dispositivo, debido al límite de resolución de éste o el ruido de alta frecuencia superpuesto a la señal. En la práctica, conseguir un transitorio del tipo delta de Dirac resulta imposible. Son factores inevitables, y por tanto se necesita una calibración que reduzca los errores. Para ello se dispone de algoritmos de control de errores constituidos por filtros gaussianos, cuyo objetivo consiste en asemejar lo máximo posible la señal de referencia a un pulso.

El proceso de *deconvolución* es una operación matemática empleada en la restauración del perfil de carga, donde se puede recuperar cierta información gracias al calibrado de la señal de referencia. La resolución consiste en estimar lo mejor posible la señal de referencia para despejar la incógnita de la función de transferencia, y junto con la señal

2. La carga espacial.

detectada por el sensor, realizar el proceso. Debido a ello el procedimiento necesita la señal detectada y la señal de referencia sometida a un proceso de calibración o tratamiento.

$$L^{-1}\left[\frac{\varepsilon_1 \cdot V}{v_p \cdot d_1} \cdot \frac{V_s(s)}{V_1(s)}\right] \Rightarrow \text{deconvolución} \Rightarrow \rho(x)$$

Se debe tener en cuenta que la muestra de ensayo puede acumular carga intrínseca al estar envejecida, por lo que puede ser necesario cambiar la muestra para obtener la señal de referencia donde sólo debiese aparecer carga en los electrodos (con una forma lo más parecida posible a una delta de Dirac). Para obtener la señal de referencia el campo eléctrico transitorio e puede cambiar si se utiliza una muestra sin carga intrínseca con otro grosor d_1 distinto al de la muestra del ensayo, por tanto el campo eléctrico se convierte en e_1 , que puede ser ponderado con la siguiente relación:

$$\left. \begin{array}{l} e = \frac{u_p}{d} \\ e_1 = \frac{u_p}{d_1} \end{array} \right\} \Rightarrow e_1 = e \cdot \frac{d}{d_1}$$

Con u_p como tensión de pulso aplicada en ambas muestras.

Normalmente la señal de referencia es obtenida con poca tensión DC, para evitar aparición de carga intrínseca en la masa del material y sólo considerar la acumulada en la interfaz de los electrodos. Simultáneamente se aplica una tensión pulsante adecuada en magnitud para que el perfil sea lo más parecido a la señal delta de Dirac; habitualmente con mayor nivel de pulso el perfil se hace más perceptible. En todo caso, lo habitual es tratar de obtener un perfil Gaussiano en las inveraces electrodo-dieléctrico.

Llegado a este punto, obtener los perfiles de tensión y campo eléctrico a lo largo del grosor de la muestra resulta sencillo sin más que considerar una ecuación de Maxwell y la relación campo-tensión:

$$\begin{aligned} \text{div} \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon} \Rightarrow E(x') = \frac{1}{\varepsilon} \int_{-\infty}^{x'} \rho(x) \cdot dx \\ \vec{E} &= -\overrightarrow{\text{grad}V} \Rightarrow V(x') = -\int_{-\infty}^{x'} E(x) \cdot dx \end{aligned}$$

2. La carga espacial.

La Figura 2.23 muestra un esquema donde se resumen los pasos para el cálculo de la distribución de densidad de carga, de campo eléctrico y de potencial; según el tratamiento implementado por la técnica PEA.

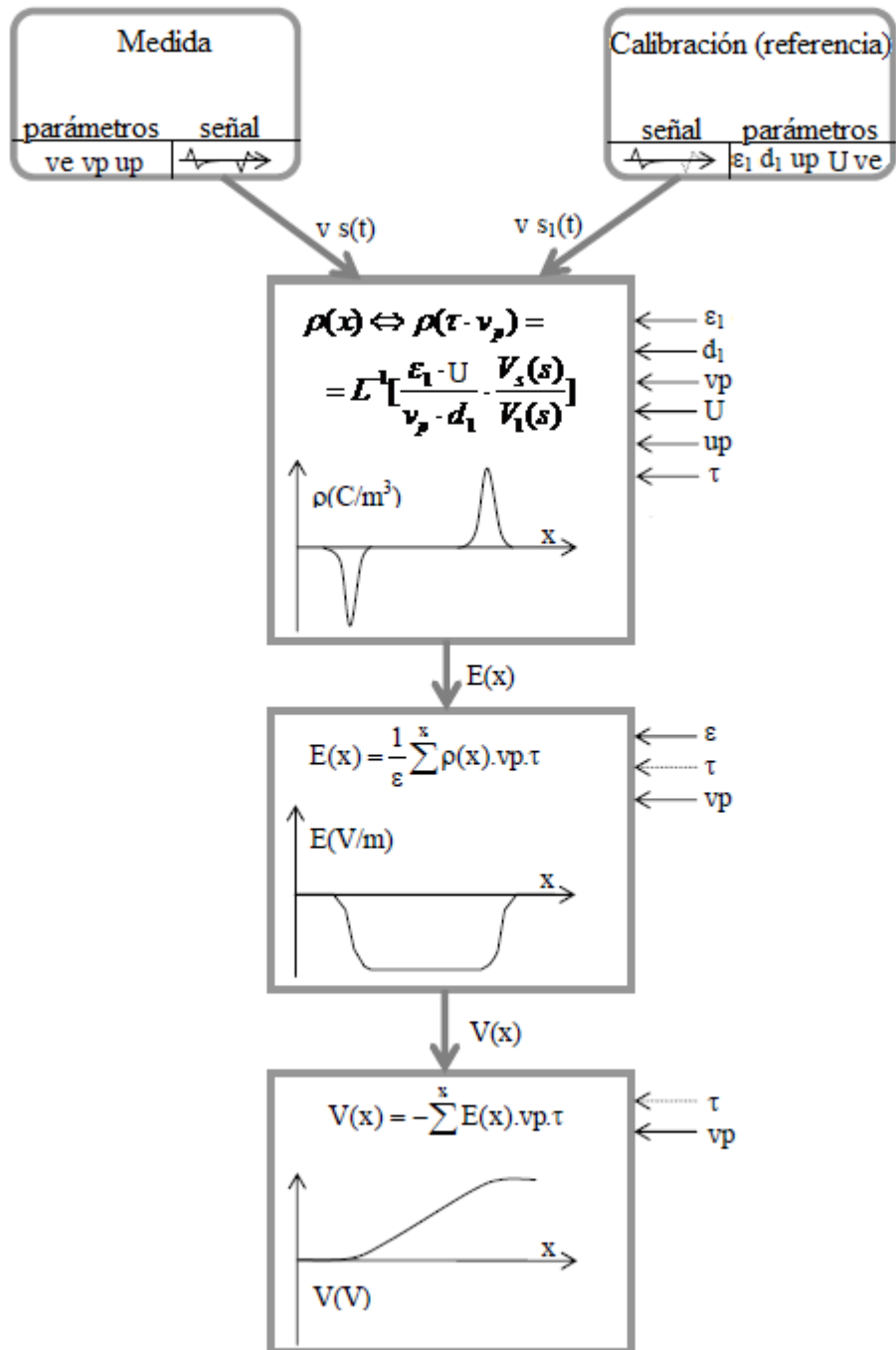


Figura 2.23.- Diagrama del tratamiento implementado por PEA. ([Gallot-lavallée, 2000]).

2. La carga espacial.

Suposiciones realizadas a lo largo de la demostración.

Se han considerado una serie de hipótesis necesarias para llegar al modelo matemático del método PEA.

- Distribución de carga homogénea debido al comportamiento como sistemas indeformables de las capas elementales de carga.
- Retorno de las capas de carga a su posición original después de una perturbación: propiedad de elasticidad.
- Se considera insignificante la variación del campo eléctrico que produce la tensión pulsante debido al desplazamiento de las cargas.
- La propagación del campo eléctrico aplicado por el pulso de tensión se considera instantáneo si se compara con la velocidad acústica de las ondas.
- Propagación de la onda acústica sin disipación ni absorción.

Capítulo 3.- Metodología experimental. Introducción al equipo PEA de TechImp Systems S.r.l.

El equipo PEA de *TechImp Systems S.r.l.* se utiliza para detectar la carga espacial sobre una dimensión de muestras de polímeros con espesores de hasta 0.5 mm, basándose en la técnica del pulso electroacústico. Consiste en aplicar a una muestra de ensayo una alta tensión de hasta 30kV con un generador de alta tensión que provoca un campo eléctrico en la muestra y permite polarizarla. Una serie de pulsos de baja tensión (hasta 500V) de muy corta duración son superpuestos sobre la alta tensión, y serán los encargados de provocar el ligero desplazamiento de las cargas para producir las ondas acústicas. Como se ha descrito en la introducción a la técnica PEA cada pulso produce una fuerza eléctrica que provoca desplazamientos de las cargas y se generan ondas de presión acústicas en correspondencia con el nivel de carga de cada estrato del espesor de la muestra. La señal de presión resultante es detectada por un transductor piezoeléctrico, de tal manera que la distribución de carga en la muestra bajo prueba puede ser obtenida a través de la señal de salida del transductor. Esta señal de tensión de salida junto a una señal de los pulsos de tensión aplicados que se utiliza como trigger para sincronizar las señales, son enviados a un osciloscopio que configurado adecuadamente monitoriza periódicamente en pantalla la imagen del perfil de carga detectado.

Para cada tarea antes descrita el equipo de medida PEA consta de un componente o dispositivo seleccionado para realizar cada función que será descrita a continuación.

Es necesario destacar las medidas de precaución y seguridad que se describen en la Instrucción Técnica del equipo ([LINEALT, 2008]), que se deben tener muy en cuenta ya que el equipo trabaja con altas tensiones de hasta 30 kV. Se debe exigir al usuario una formación técnica en electricidad que permita el correcto uso sin perjudicar al equipo ni a personas.

3.1.- Componentes del equipo.

El sistema PEA de TECHIMP está compuesto por:

- Celda de medida PEA.
- Generador DC de alta tensión *HVDC*.
- Generador de pulsos de tensión de hasta 500V.
- Generador de 15V DC para la alimentación de los amplificadores.
- Osciloscopio digital.

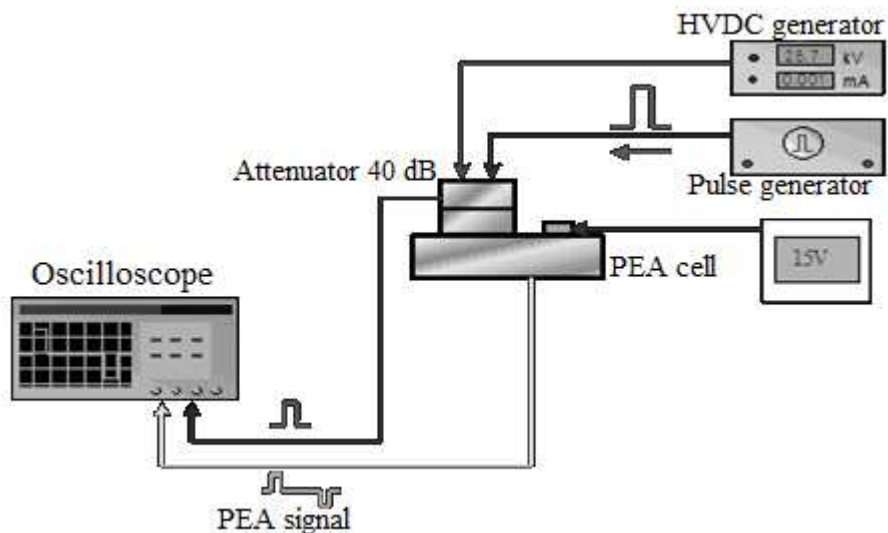


Figura 3.1.- Componentes del equipo PEA de TECHIMP.

Celda de medida PEA de TECHIMP.

La celda de medida es la parte principal del equipo PEA. Básicamente está constituida por dos electrodos, el superior o cilindro de cobre, y la base de aluminio o electrodo inferior. En ella se introduce la muestra a estudiar, y las siguientes conexiones:

- La fuente de AT.
- El generador de pulsos.
- La entrada de 15V para alimentar el sistema piezoeléctrico y amplificador.
- La señal de los pulsos de tensión, modificada por un atenuador en el interior del cilindro superior que se usa para reducir la amplitud del pulso, de manera que este pueda ser usado en el osciloscopio, y utilizado como trigger.
- La señal de salida detectada por el transductor piezoeléctrico.
- Y la puesta a tierra.

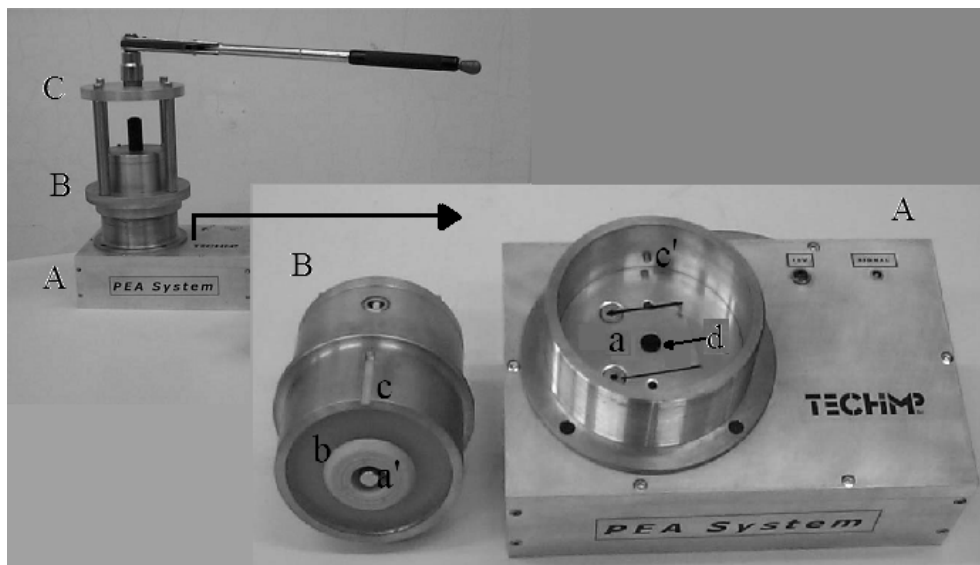


Figura 3.2.- Componentes básicos de la celda de medida PEA.

La celda está compuesta por las siguientes unidades, haciendo referencia a la Figura 3.2:

- La base de aluminio, etiquetada como *A*, contiene en electrodo inferior de aluminio, que contiene el sistema de amplificación y el sistema de captación de señal, basado en un transductor piezoeléctrico.
- Cilindro de cobre, *B*, que contiene el condensador de acoplamiento, la resistencia, el atenuador y el electrodo superior de cobre.
- La pieza marcada como *C* es usada para cerrar la celda asegurando la correcta presión entre los electrodos y el objeto de ensayo. Debe ser usada una llave dinamométrica para efectuar el cierre. El rango de apriete es desde 15 hasta 30 Nm, para no perjudicar una pieza de material semiconductor interpuesta entre la muestra y el electrodo superior.

La forma de colocar la celda para el funcionamiento es simple. Primero se coloca el elemento de ensayo sobre la base de aluminio *a* en el hueco del anillo donde encajará el cilindro superior *B*, con una pequeña gota de aceite de silicona en la base del electrodo de aluminio.

Una pieza de material semiconductor *d* es interpuesta entre el elemento de ensayo y el electrodo superior de cobre *a'*, con el fin de permitir una buena propagación de la onda de tensión generada por el generador de pulsos.

Un anillo de caucho *b* es unido a la base del cilindro con grasa de silicona, su función es la de aislamiento eléctrico y también conseguir un apriete adecuado entre la base y el cilindro evitando el desgaste de las piezas metálicas debido al rozamiento.

La forma de encajar el cilindro de cobre consiste en hacer coincidir el saliente *c'* con el hueco *C*, deslizar hacia la parte inferior el cilindro y por último hacer el apriete mediante la pieza *C* y la llave dinamométrica.

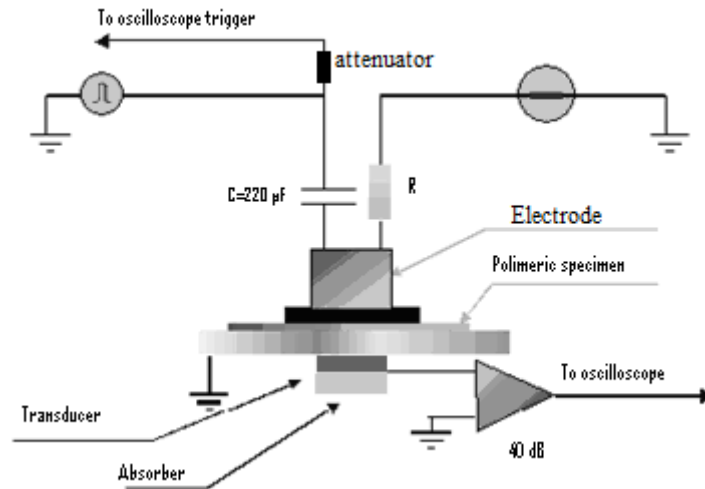


Figura 3.3.- Componentes específicos de la celda de medida PEA.

En el interior de la celda existen tanto en el cilindro superior como en la base de la celda componentes específicos para realizar diversas funciones descritas a continuación. En el cilindro superior se encuentran los siguientes componentes:

- 1) Una resistencia R en la conexión de la fuente de AT, su función es reducir la corriente de descarga en caso de ruptura del espécimen ensayado.
- 2) El generador de pulsos está acoplado capacitivamente como muestra la Figura 3.3, mediante un condensador de acoplamiento en la trayectoria de la señal, que se encuentra en el cilindro superior de cobre, con el objetivo de establecer un aislamiento en continua de la fuente al electrodo. Con otras palabras, la idea de una fuente acoplada capacitivamente es la de dejar pasar de la fuente a la carga solamente la parte periódica de la señal.
- 3) Un atenuador reduce la amplitud de los pulsos de tensión para que esta señal pueda ser conectada al osciloscopio en su función trigger, para sincronizar todas las demás señales.

En la base de aluminio de la celda se encuentran:

- 1) El transductor piezoeléctrico, parte fundamental del equipo, es el elemento que se encarga de captar los pulsos acústicos procedentes de las cargas en el espécimen y transformarlos en una señal de tensión que caracteriza ese perfil de carga en el elemento de ensayo. Está construido con PVDF (“polifluoruro de vinilideno”) con las siguientes características técnicas:

<i>Propiedades del PVDF</i>	Símbolo	Valor	Unidad
Grosor	a	9	μm
Constante piezoeléctrica	d_c	-33×10^{-3}	$(\text{C}/\text{m}^2)/(\text{N}/\text{m}^2)$
Capacidad	C_p	379×10^{-12}	F/cm^2
Impedancia acústica	Z_p	3.9×10^6	$\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}^2$
Densidad	ρ	1.78×10^3	Kg/m^3
Velocidad del sonido	v_p	2.2×10^3	m/s

Tabla 3.1.- Propiedades del transductor piezoeléctrico.

- 2) El sistema de amplificación constituido por dos amplificadores operacionales de banda ancha y bajo ruido con las siguientes características:

Impedancia de entrada	Rango de frecuencias	Ganancia
50Ω	0.1-500 MHz	25 dB

Tabla 3.2.- Propiedades de los amplificadores.

Condiciones de uso y datos técnicos de la celda:

- Máxima temperatura: 70 °C.
- Máxima tensión: 30 kV.
- Peso: 12 kg
- Dimensiones de la base (mm): 250x160x750
- Dimensiones del cilindro: $d = 100\text{mm}$; $h = 120\text{ mm}$.
- Resolución espacial para XLPE: $\approx 10\text{ }\mu\text{m}$
- Sensibilidad respecto a la carga interna: $0.1\text{ C}/\text{m}^3$

Generador DC de AT.

El generador DC de Alta Tensión HVDC proporciona un nivel de tensión continua entre 0 y 30 kV, entre los electrodos de la celda de medida PEA.



Figura 3.4.- Panel frontal del generador de alta tensión HVDC.

El panel frontal contiene el interruptor de encendido *POWER*, sirve para encender la fuente. El interruptor *OUTPUT* permite aplicar tensión cuando está en la posición *ON*, y quitar tensión en la posición *OFF*. El interruptor *POLARITY* cambia la polaridad de la fuente.

El pulsador *SET VALUES* permite establecer el nivel de tensión que se selecciona con la ruleta de ajuste *CV* en la pantalla *VOLTAGE* y es memorizado previamente para ser aplicado de forma inmediata sin necesidad de ajustar manualmente el valor subiendo tensión de manera paulatina (solamente hay que accionar *OUTPUT* a *ON*); este valor es cero cuando *OUTPUT* está en *OFF*, pese a tener seleccionado un valor de tensión distinto de cero. Del mismo modo permite establecer el valor límite de corriente de cortocircuito seleccionado con la ruleta de ajuste *CC* en la pantalla *CURRENT*. Como regla general, es conveniente limitar el generador HVDC a una corriente de 0.05 mA; no obstante, dependiendo de la capacidad de aislar alta tensión por parte del espécimen, este valor puede ser modificado.

El panel trasero contiene la alimentación del generador, la salida de Alta Tensión, y la importante conexión de puesta a tierra.

Generador de pulsos de hasta 500V.

El generador de pulsos proporciona un pulso con una amplitud comprendida entre 0 y 500 V y con un periodo de 10 ns.

El panel frontal contiene el interruptor de encendido, la salida del pulso de tensión y un ajuste de la amplitud de pulso, que permite establecer el porcentaje de la tensión máxima aplicable (entre el 0 y 100% de 500V). El panel trasero contiene la alimentación del generador.



Figura 3.5.- Panel frontal del generador de pulsos de hasta 500 V.

Datos técnicos:

- Peso: 1kg
- Dimensiones (mm): 180x150x100
- Amplitud del pulso de tensión: 0 – 500V
- Periodo: 10 ns
- Frecuencia: 160 Hz

Generador de 15V DC para la alimentación de los amplificadores.

Consiste en un generador de tensión que proporcione 15 V de tensión continua para la alimentación del sistema de amplificación. Es conectada en la base de aluminio de celda.

Osciloscopio digital.

El osciloscopio Tektronix TDS 5032 es el encargado de leer las señales de entrada del equipo y monitorizar los perfiles detectados en la pantalla. Tiene instalado el Sistema Operativo Windows 2000 lo que permite trabajar como un ordenador personal guardando los ensayos en su disco duro. Antes de realizar cualquier ensayo el osciloscopio debe ser configurado con los siguientes parámetros:

- Se selecciona DC coupling 50 Ohm para el canal de adquisición.
- Se selecciona DC coupling 50 Ohm para el canal de trigger.
- Se aplica un nivel de trigger de 0.5V.
- Se selecciona el canal elegido para el trigger (pulsos de tensión), se aplican 20 ns/div para la escala de tiempos y 1 V/div para la escala de tensión.
- Se selecciona el canal de adquisición y se aplica un nivel de retraso de trigger apropiado (necesario porque el electrodo inferior de aluminio representa un retraso temporal para la onda de presión de alrededor de 2.4 μ s).
- Se aplica un valor apropiado para la escala de tiempos, y un valor apropiado de *mV/div* de manera que la señal abarque lo máximo sin exceder la escala.

Sin embargo en el osciloscopio está guardado un ejemplo de configuración llamado *Pea-setup.set*, en el menú *file\recall*, al que se accede desde el programa de visualización del osciloscopio *TEKSCOPE*. Esto permite simplificar el ajuste para la visualización. En ese caso, la señal detectada por el transductor se conecta en el canal 1 y el trigger en el canal 2.

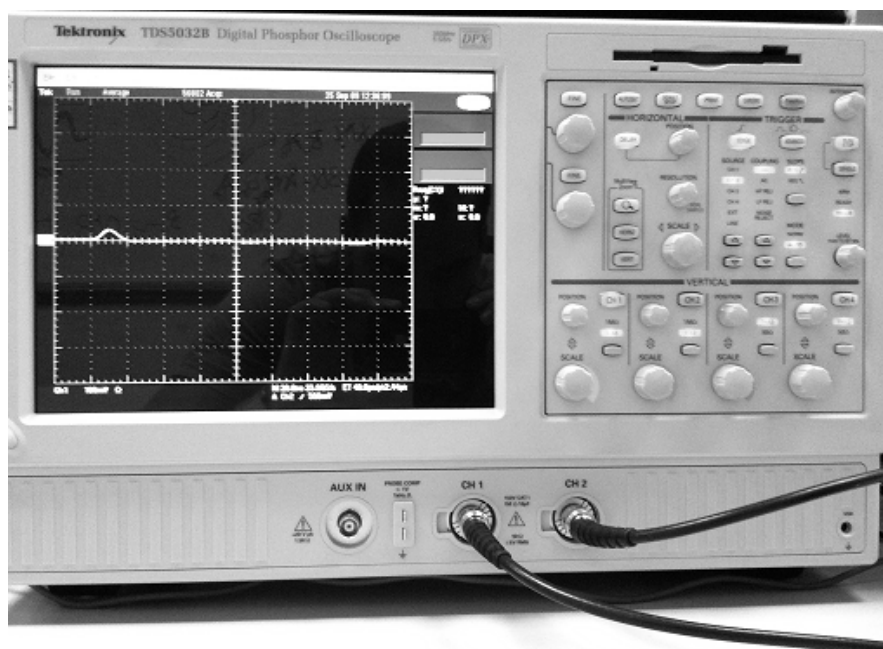


Figura 3.6.- Osciloscopio Tektronix TDS 5032, en su pantalla aparece el programa *TEKSCOPE* de visualización.

3.2.- Conexiones del equipo.

Las conexiones del equipo de medida se dividen en conexiones a la celda y en conexiones al osciloscopio.

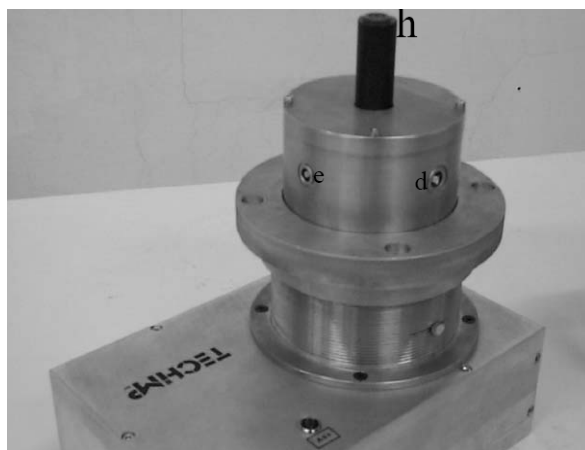


Figura 3.7.- Celda de medida PEA, señalando conexiones del cilindro de cobre o electrodo superior.

En la Figura 3.7 se observa el cilindro de cobre o electrodo superior y en él están señaladas sus conexiones. Referido a la Figura 3.7 en *h* se conecta el generador de alta tensión HVDC. Por la entrada *e* se conecta el generador de pulsos, también indicado en el cilindro como *Pulse Input*. En *d* está la salida de la señal de pulso atenuada que se conectará al osciloscopio, también indicada en el cilindro como *Trigger Out*.

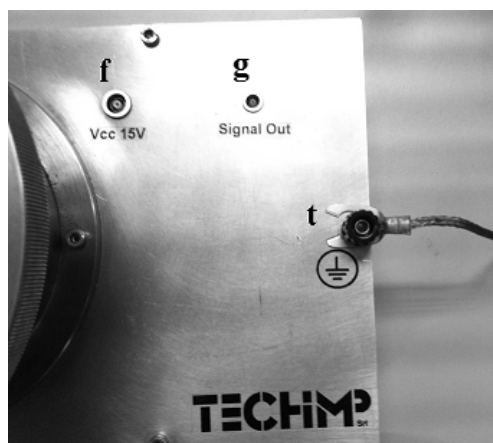


Figura 3.8.- Conexiones de la base de la celda o electrodo inferior.

En la base de la celda como se muestra en la Figura 3.8 se encuentran las conexiones de la señal de salida en la conexión marcada como *g* e indicada en la celda como *Signal Out*. La entrada *f* se emplea para la alimentación de los amplificadores (fuente de tensión de 15 V), y en *t* se encuentra la conexión a tierra de la celda.



Figura 3.9.- Conexiones del osciloscopio.

La Figura 3.9 muestra los canales del osciloscopio del equipo de medida junto a sus respectivas conexiones. En el canal 1 *CH1* se conecta la señal proporcionada por el sistema de transducción y amplificación, es decir la salida *Signal Out* de la base de la celda.

En el canal 2 *CH2* del osciloscopio se conecta la señal atenuada de los pulsos de tensión, es decir la salida *Trigger Out* del cilindro de cobre o electrodo superior de la celda. Esta señal es atenuada en el cilindro para poder ser utilizada en el osciloscopio como función trigger y sincronizar con la señal que representará el perfil de carga espacial. Con la configuración realizada del osciloscopio y los componentes conectados ya es posible comenzar los ensayos.

3.3.- Aspectos de software.

El software del equipo se encuentra instalado en el osciloscopio y consta de una serie de programas independientes (software de adquisición, software de calibración, software de procesamiento y software de visualización). Siguiendo un orden y las instrucciones adecuadas los resultados en un ensayo serán correctos.

Software de adquisición, AcqPea.

El programa de adquisición, llamado *AcqPea.exe* es el encargado de recoger los datos pertenecientes a la señal adquirida por el osciloscopio. Pero antes de iniciar el programa es importante observar la señal con la aplicación *TEKSCOPE* del osciloscopio para visualizar los canales. Es importante no salir de esta aplicación pues el software de

adquisición no puede recoger la señal, ya que *TEKSCOPE* permite observar las señales de entrada con el osciloscopio, y si está cerrado, el osciloscopio pierde la función de monitorizar las señales de entrada por los canales. Se dejará la aplicación *TEKSCOPE* minimizada en la barra de tareas sin salir de ella, tal y como aparece en la Figura 3.10.

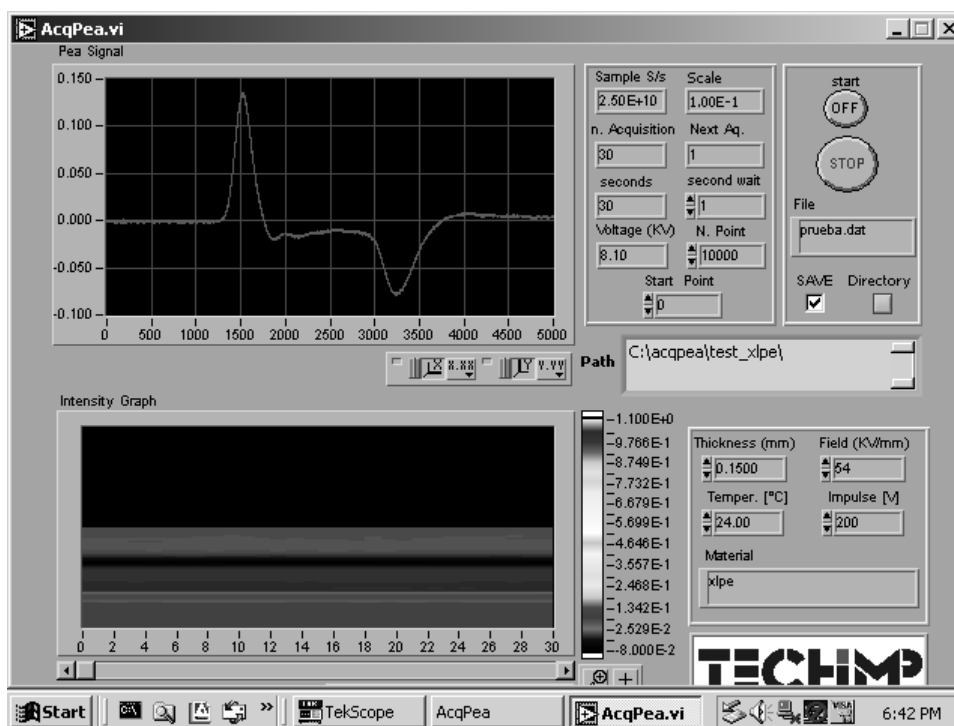


Figura 3.10.- Interfaz gráfica del programa de adquisición.

Este programa guarda ficheros *.dat* en un número determinado por el tiempo de adquisición controlable pulsando con el puntero en los botones de *OFF* para inicio, y *ON* para fin. Los ficheros contienen la información para representar los perfiles de carga correspondientes a cada adquisición. Como se observa en la Figura 3.11, los ficheros *.dat* contienen información numérica, pueden ser almacenados con cualquier extensión de archivo (*.xls*, *.doc*) y su información puede ser tratada con otros programas informáticos como por ejemplo *Matlab* o *Excel*.

Los ficheros *.dat* contienen valores numéricos (tantos como se hallan seleccionado en *N.point*), con la información para representar el perfil de distribución de carga espacial acumulada a lo largo del grosor del espécimen en ensayo. El número de valores seleccionado determinará la resolución espacial, conociendo el espesor de la muestra.

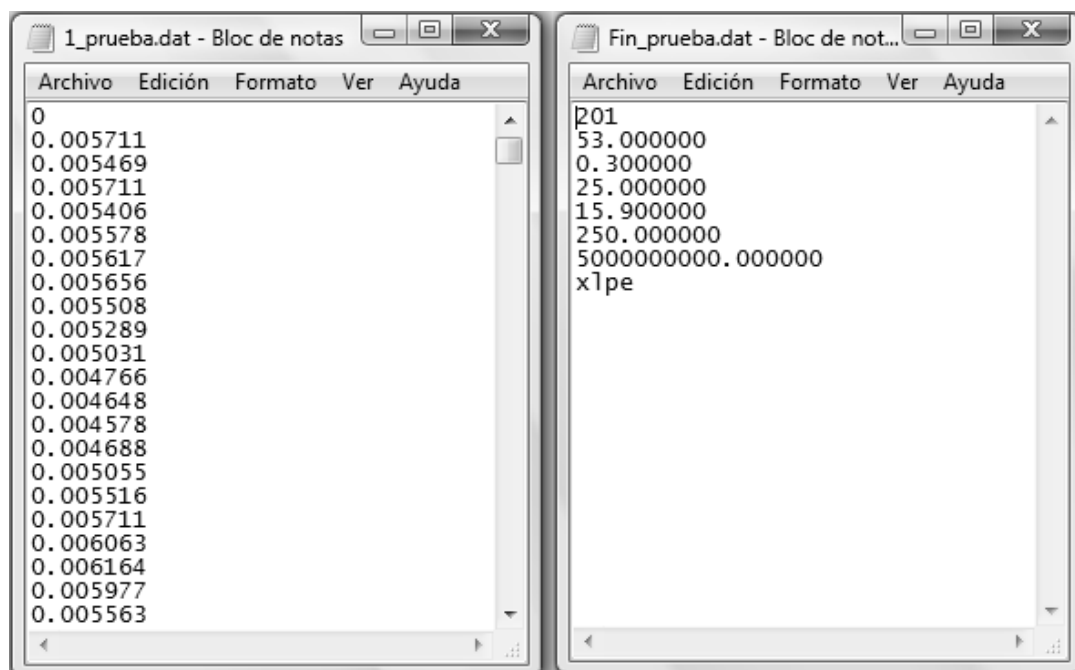


Figura 3.11.- Ejemplos de ficheros .dat: (a) primer fichero de adquisición en el ensayo “prueba”, (b) fichero fin.dat con las condiciones del mismo ensayo.

En estos ficheros los valores numéricos son valores de tensión (Vs, en voltios) proporcionados por el transductor piezoeléctrico, almacenados con el programa de adquisición. Posteriormente estos ficheros son tratados en el programa de procesamiento junto con la señal de referencia, para proporcionar los perfiles de distribución de densidad de carga espacial.

También genera un fichero llamado *fin.dat* creado con la información sobre las condiciones del test y del espécimen (Figura 3.11 derecha); será el fichero utilizado por el software de procesamiento y por el de visualización. Todos los ficheros que hacen referencia a un mismo test se almacenan en el mismo directorio.

Las siguientes instrucciones muestran cómo hacer uso del programa de adquisición. Todas las operaciones hacen referencia a la Figura 3.10.

- Se introducen los valores del grosor de la muestra *Thickness*, valor del campo *Field*, temperatura *Temper* y nombre de la muestra *Material*. Todo esto se almacenará en el fichero fin.dat.
- Se introduce el tiempo deseado *second wait* (en segundos) que determina el tiempo que transcurre entre cada adquisición, el número de puntos *N.point* que serán adquiridos en cada fichero, y el punto inicial *Start Point* para iniciar la adquisición. El resto de datos de esta pantalla serán introducidos automáticamente por el programa.

- Se escribe el nombre del fichero *File*, y se selecciona el directorio donde se guardarán los datos *Path*.
- Se selecciona *save* y se hace clic en el botón *Off*. Este botón pasará a marcar *on*, lo que indica que la recogida de datos está en marcha.

Durante el proceso de adquisición se representan el perfil de carga y un modelo tridimensional que muestra con colores los niveles de carga acumulada en el material a lo largo del tiempo de ensayo en el espesor de la muestra.

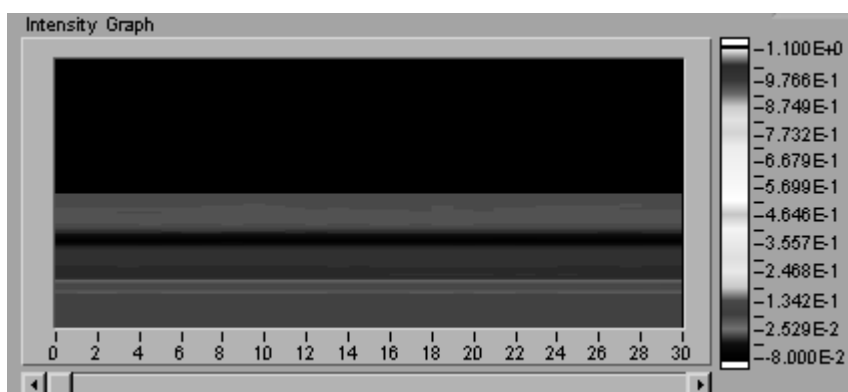


Figura 3.12.- Modelo tridimensional que representa la evolución del perfil de carga en el programa de adquisición, (abajo a la derecha, Figura 3.10).

Una vez que se han recogido suficientes datos (a juzgar por el que realiza el ensayo), se pulsa en *On* para detener la recogida de datos, y posteriormente en *Stop*. Se creará el fichero *fin.dat* y se cerrará el programa de adquisición. Si se pretende sólo parar temporalmente la grabación para cambiar algún parámetro (por ejemplo, tiempo entre adquisiciones *second wait*), y posteriormente continuarla, sólo habrá que pulsar primero sobre *ON* y una vez cambiado el parámetro, continuar midiendo pulsando sobre *OFF*.

Software de calibración, *CalibPea*.

El software de calibración permite corregir la distorsión de la señal de referencia debida a los componentes de transducción y amplificación. Consiste en corregir cierto ruido provocado por el acoplamiento capacitivo entre el amplificador y el sensor piezoeléctrico, y obtener la señal de referencia necesaria para el proceso de deconvolución, limitada por la resolución del dispositivo, que debe ser lo más parecida al pulso instantáneo o función delta de *Dirac*.

Las siguientes instrucciones muestran cómo utilizar el software:

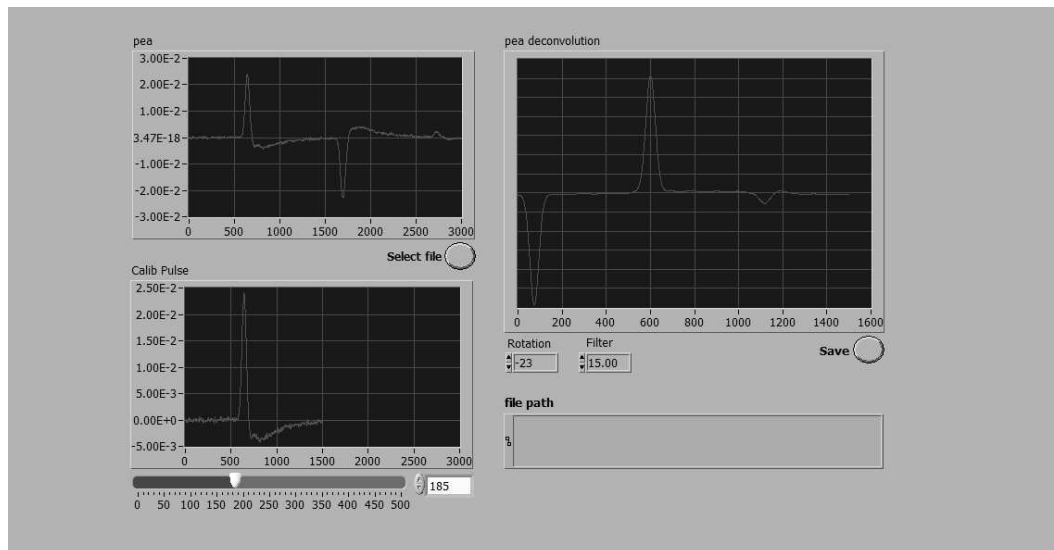


Figura 3.13.- Interfaz gráfica del programa de calibración.

- Se ejecuta el programa, se elige el fichero normalmente captado pocos segundos después de conectar la fuente y el generador de pulsos para evitar los efectos transitorios, y a bajo nivel de campo (típicamente cerca 5kV/mm) para evitar la aparición de carga espacial en el interior de la lámina y la inyección de carga en ella por parte de los electrodos que puedan distorsionar la forma de la señal de referencia deseada.
- Se cambia el valor de la barra situada bajo la gráfica del pulso de calibración *Calib pulse* para pasar de la señal original a la señal corregida. Lo normal es escoger un valor central para que la señal quede bien definida.
- Se ajusta el valor de rotación y filtro. Con *rotation* se desplaza la señal horizontalmente, de manera que quede bien centrada y se vean los puntos característicos, como por ejemplo la carga en los electrodos. Mediante *filter* se le aplica un filtro, con el fin de eliminar ruido y centrarnos únicamente en los puntos significativos. Al reducir el valor de filtrado disminuye mucho el ruido superpuesto a la señal, pero el pulso se ve reducido en su amplitud y se hace más ancho. Por el contrario al aumentar el nivel de filtrado el pulso se acentúa mucho más (más similar a una delta de Dirac) pero aparece más ruido superpuesto. Típicamente el intervalo de valores de filtrado más apropiado se encuentra entre 6 y 20.
- Se salva el fichero de calibración: se guarda en el mismo directorio utilizado por los ficheros de adquisición, con la misma extensión *.dat* y con el nombre que se desee para ser reconocido posteriormente y utilizado en el procesamiento. Al fichero también se le puede asignar cualquier extensión de archivo, para ser usado por otros tipos de programas.

Software de procesamiento, ElabPea.

El programa de procesamiento se encarga del tratamiento de los ficheros de datos adquiridos. Las siguientes instrucciones muestran la como utilizar el software.

- Abrir el programa. La interfaz gráfica es la siguiente.

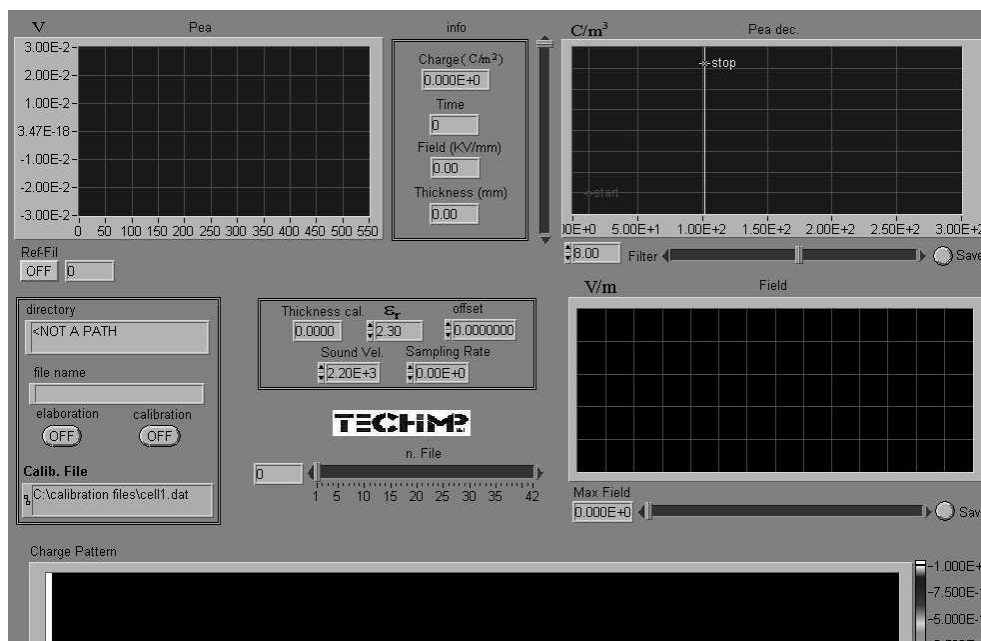


Figura 3.14.- Interfaz gráfica del programa de procesamiento.

- En la Figura 3.14 se selecciona el fichero de calibración (obtenido anteriormente con el software de calibración), en la ventana que aparece parpadeando, en *Calib. File*. Se selecciona ese fichero usado por el programa para realizar el proceso de deconvolución y corregir la distorsión.
- Al pulsar sobre el botón *OFF* en *elaboration*, aparecerá una ventana donde se pedirá el fichero creado al cerrar el programa de adquisición y nombrado por éste como *fin.dat*.



Figura 3.15.- Ventana para seleccionar los ficheros de calibración y el fichero fin.dat.

3. Metodología experimental. Introducción al equipo PEA de TechImp Systems S.r.l.

- Indicar la permitividad relativa (ϵ_r) del material en experimento, y la velocidad del sonido en el mismo material (sound vel., v), por ejemplo para una resina epoxi: $\epsilon_r = 3,5$ y $v = 1,78$ km/s; y para polietileno reticulado: $\epsilon_r = 2,25$ y $v = 2,34$ km/s. Esto se introduce en la ventana mostrada en la Figura 3.16. Automáticamente el software calculará los demás valores.

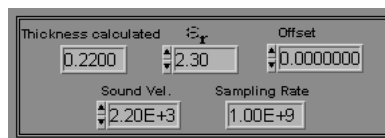


Figura 3.16.- Ventana para introducir valores teóricos de las condiciones del ensayo.

- El procesamiento se realiza pulsando el botón OFF de *Calibration* de la Figura 3.17. Los resultados obtenidos tras el procesamiento son mostrados en la misma figura.

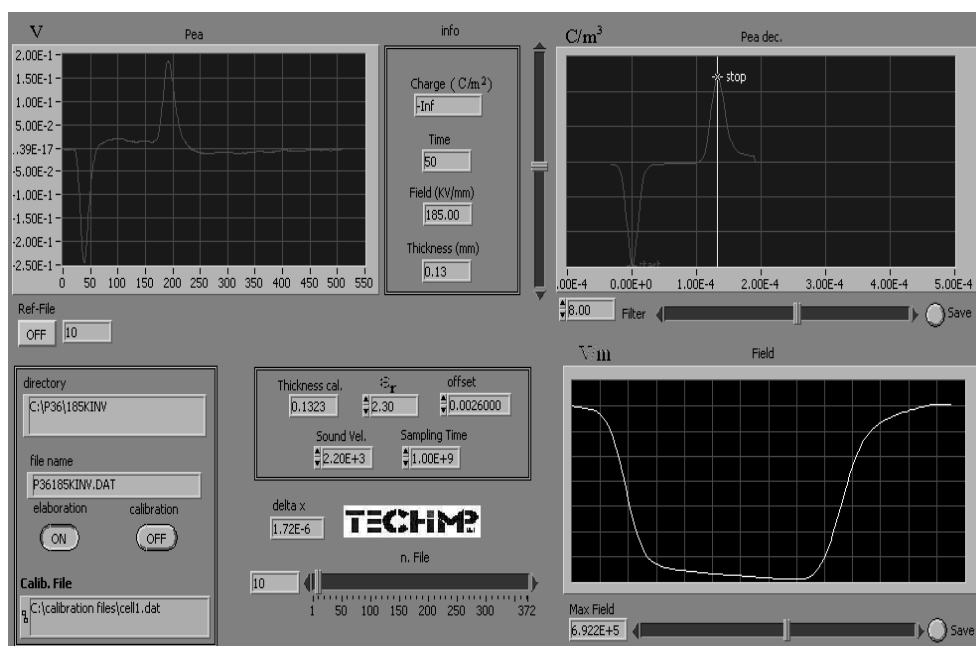


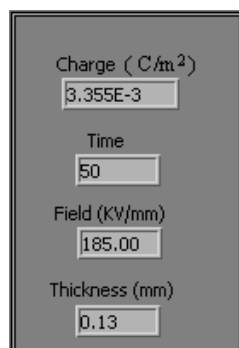
Figura 3.17.- Perfiles observados tras el procesamiento de los datos de un ensayo.

La Figura 3.17 muestra, en el lado izquierdo, la ventana con la señal de perfil de carga adquirido. En el lado derecho, se muestra el perfil de carga corregido *PEA deconvolution* en unidades arbitrarias (arriba en Figura 3.17) y el perfil del campo eléctrico inducido por la carga frente al grosor de la muestra (abajo a la derecha, Figura 3.17).

El campo eléctrico debe aproximarse a cero en los electrodos. Cada perfil de carga y campo inducido para cada adquisición puede ser visualizado moviendo las barras que se encuentran bajo las ventanas. Puede guardarse un fichero con cualquier extensión de archivo para cada perfil con los datos numéricos del ensayo, usando el botón *Save*

indicado en cada ventana correspondiente a un perfil. Estos ficheros pueden ser utilizados como bloques de datos para programas estadístico-matemáticos como Matlab ó Excel. También es posible copiar directamente en el portapapeles de Windows usando el botón derecho del ratón y seleccionando *Copy data*.

La Figura 3.18 muestra el resultado del valor medio teórico del campo eléctrico inducido, el grosor, el tiempo de la adquisición del fichero en segundos y el valor de densidad de carga superficial en cada punto del espesor (en C/m^2); para obtener la densidad volumétrica de carga media en C/m^3 bastaría con dividir el valor de la carga superficial por el grosor de la muestra.



Parameter	Value
Charge (C/m^2)	3.355E-3
Time	50
Field (KV/mm)	185.00
Thickness (mm)	0.13

Figura 3.18.- Datos resultantes del ensayo en el programa de procesamiento.

Sin embargo, el valor de carga obtenido mediante este procedimiento está sobreestimado debido al recuento de una parte de la carga de los electrodos. La cantidad real de carga espacial se puede conseguir restando la carga obtenida en una muestra donde no exista carga espacial en el interior de ésta. Esto se puede hacer eligiendo el perfil sin carga interna pulsando el botón *Ref-file* bajo el perfil de carga adquirido, que puede ser un fichero recogido en las primeras adquisiciones donde sólo se observe carga inicial en los electrodos (típicamente, medidas hechas a menor tensión). Pero también el programa calcula la carga acumulada integrando la curva del perfil de carga, con unos límites de integración marcados por las líneas de la ventana del perfil de carga corregido. Moviendo estas líneas la carga adyacente a los electrodos puede ser totalmente excluida como se observa en la Figura 3.19.

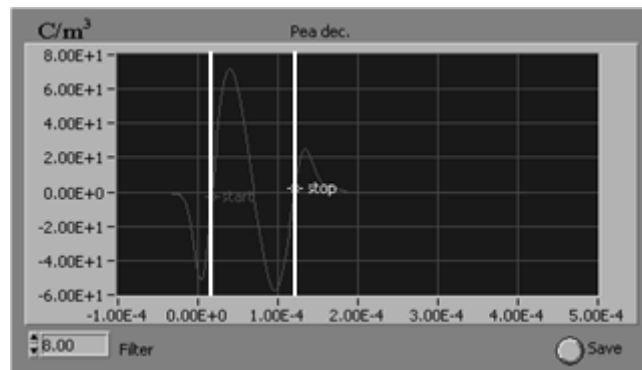


Figura 3.19.- Supresión de la carga de los electrodos moviendo las líneas de integración.

Otra información importante del ensayo que puede obtenerse con este programa es el modelo coloreado, referente a la evolución espacio-temporal de la carga. Cada representación tiene tres dimensiones: grosor, tiempo y carga. El grosor es el eje Y, el cátodo y el ánodo aparecen bien diferenciados. El tiempo es el eje X, y la tercera dimensión es la magnitud de la carga detectada, representada mediante una escala de colores. Hay 20 colores diferentes que representan 20 niveles distintos de carga en una escala decimal. Todos los valores que excedan del máximo, positivo o negativo, se asocian al un color referente. Esto puede ocurrir, en particular, en los electrodos, donde la tensión aplicada provoca los mayores niveles de carga. Para llegar al modelo en 3D, se realiza el calibrado, se selecciona con la barra el fichero número 1 y se pulsa en el botón *pattern*. Es posible salvar una imagen del modelo usando el botón *Save Bitmap*.

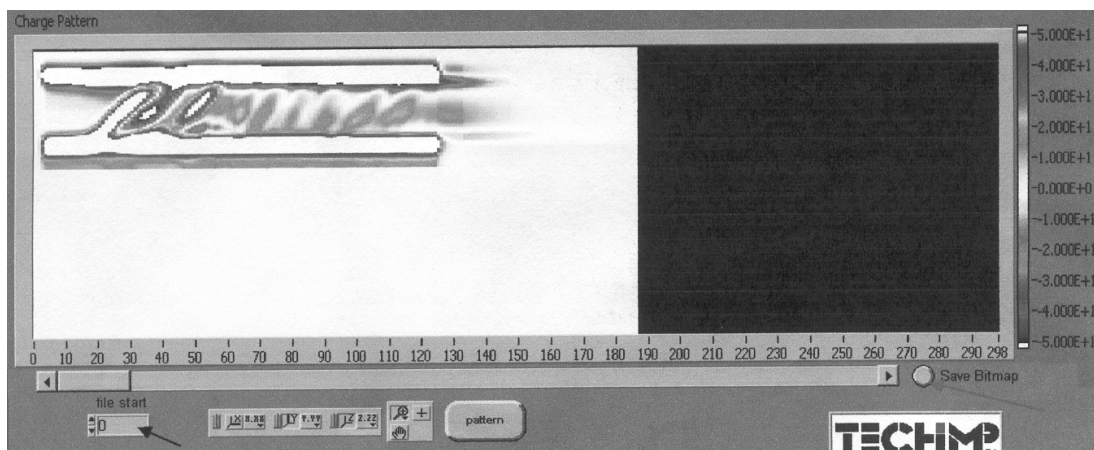
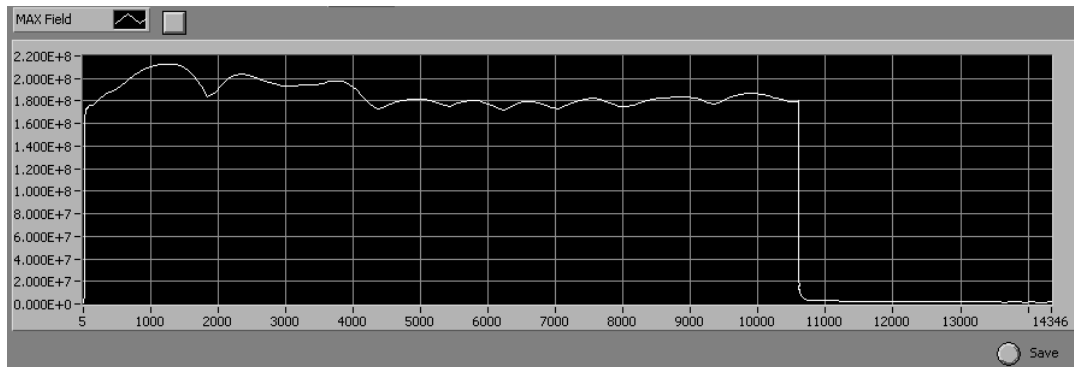
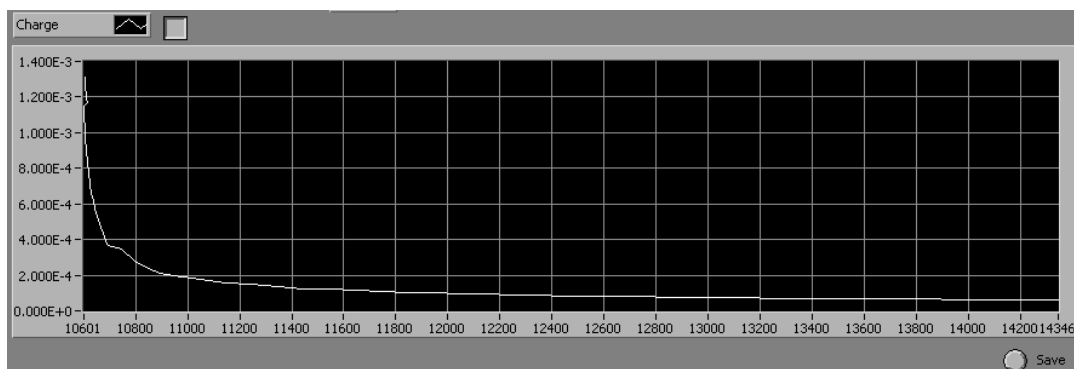


Figura 3.20.- Evolución 3D de la carga en la muestra durante el ensayo.

También se observa la evolución del perfil de campo inducido por la carga con respecto al tiempo, y una gráfica carga frente a tiempo. Para obtenerla hay que detener el programa, reiniciarlo, pulsar el botón próximo a *MAX Field* para cambiar a *Charge* y después hacer clic en el botón *pattern*.



(a)



(b)

Figura 3.21.- Evolución temporal de los perfiles de: (a) campo inducido por carga y (b) Evolución temporal de la carga.

Software de visualización, *PeaView.exe*.

El software es de gran utilidad para mostrar de una forma anticipada y sin calibración la evolución de los perfiles de carga y el modelo 3D que se observa también con el software de procesamiento, utilizando las señales que se obtienen desde el programa de adquisición. El programa carga y visualiza el contenido de archivos tipo *.dat*, que son los almacenados en las adquisiciones.

3. Metodología experimental. Introducción al equipo PEA de TechImp Systems S.r.l.

Pulsando sobre el botón *Select Data* es posible seleccionar el fichero *fin.dat* y ver la información sobre el ensayo y las condiciones del objeto. El programa leerá y visualizará todos los datos presentes en el mismo directorio del fichero *fin.dat*.

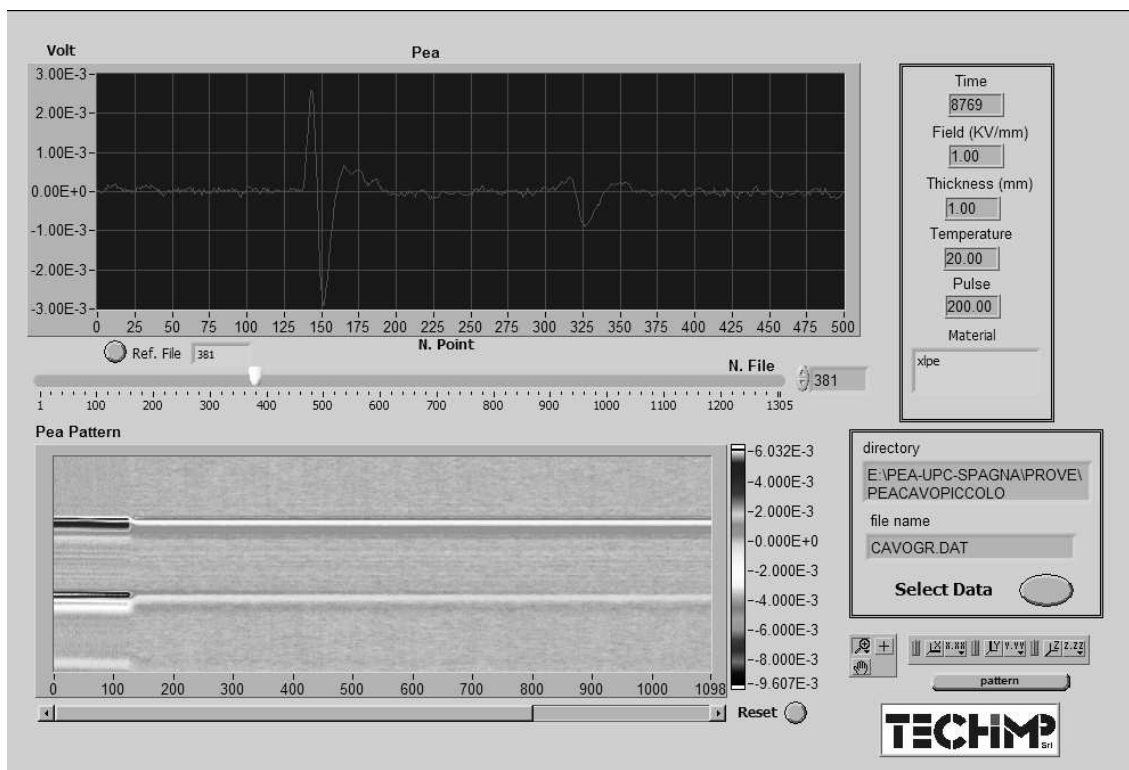


Figura 3.22.- Interfaz gráfica del programa de visualización.

Capítulo 4.- Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

A continuación se muestran los resultados experimentales de diversos ensayos realizados sobre muestras de polietileno reticulado (XLPE) de 0.15mm de espesor utilizando la técnica del pulso electroacústico con el equipo PEA de TECHIMP. El estudio de los resultados consiste en procesar los datos obtenidos mediante el software del equipo PEA de TECHIMP y obtener graficas mediante el software informático MATLAB, que permitan observar la evolución de la carga (mostrando la evolución del perfil de densidad de carga obtenido) en las muestras de XLPE bajo diversas situaciones:

- Ensayos de cambios de polaridad en la fuente de tensión de corriente continua.
- Ensayos de envejecimiento o aplicación duradera de diferentes niveles de tensión en una muestra.
- Y por último diferentes niveles de tensión en ensayos con doble muestra, con una de las dos láminas degradada previamente mediante descargas parciales.

4.1.- Ensayos de polarización.

Estos ensayos permiten observar la polarización positiva, negativa y despolarización del aislante. La característica principal que se observa es que al invertir la polaridad de la tensión aplicada entre los electrodos, las cargas que se acumulan en éstos también invierten su polaridad.

Este tipo de ensayos tienen mucho interés, pues la capacidad de evacuar carga espacial acumulada tras un proceso de polarización es utilizada como característica esencial para diagnosticar el envejecimiento a que fue sometido el material. Por tanto, un material sometido a mayor tiempo de envejecimiento térmico o eléctrico tardará más tiempo en eliminar la carga espacial acumulada tras eliminar la tensión en bornes de la muestra ([Mazzanti, 2003]).

4.1.1.- Cambios de polaridad desconectando la fuente de tensión pulsante.

El siguiente ensayo muestra la evolución de la carga en una muestra de XLPE de 0,15mm de espesor con una tensión aplicada de 10 kV cambiando la polaridad en diferentes instantes. La descripción del ensayo de la Figura 4.1 es la siguiente:

- Los primeros instantes en la muestra permanecen aplicados la fuente de tensión con polaridad positiva (10 kV) y la fuente de tensión pulsante.
- A los 30 s se desconecta la fuente de tensión, pero permanece conectada la fuente de tensión pulsante.
- A los 70 s de ensayo se desconecta la fuente de tensión pulsante, quedando la muestra sin ningún tipo de excitación.
- A los 100 s sólo se conecta la fuente de tensión pulsante.
- A los 130 s permanece conectado la fuente de tensión pulsante y se conecta la fuente de tensión con polaridad negativa (-10 kV).
- A los 170 s se desconecta la fuente de tensión con polaridad negativa, manteniendo aplicado sólo la fuente de tensión pulsante.

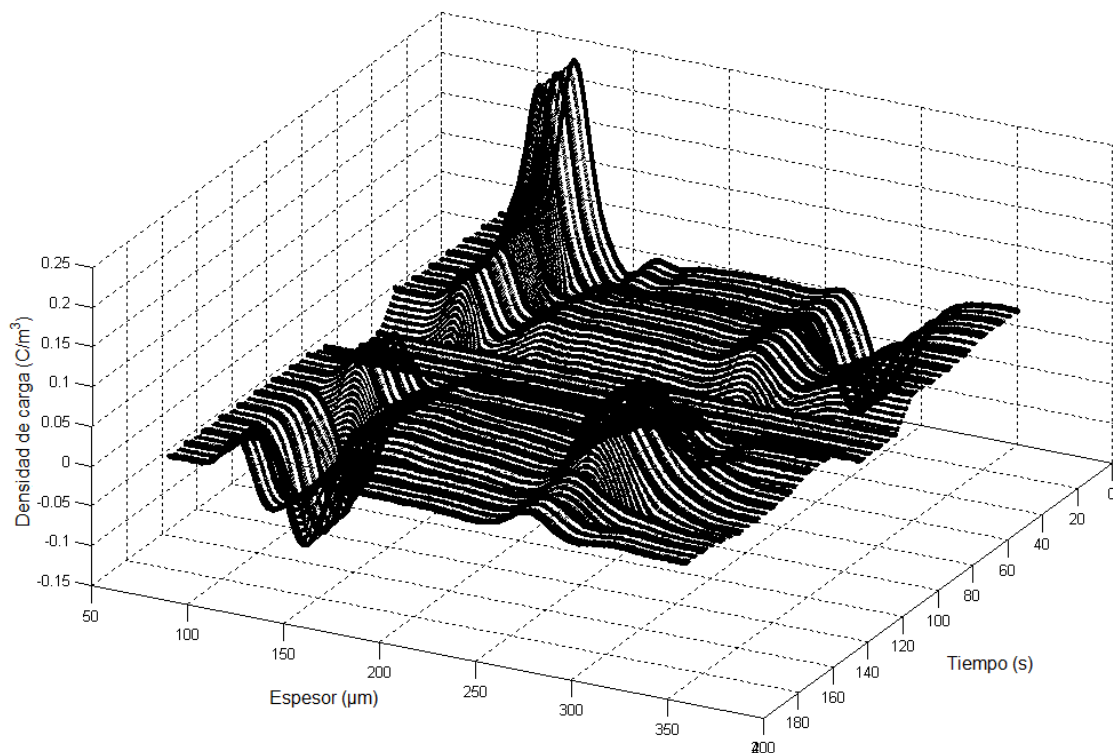


Figura 4.1.- Evolución de la carga en el ensayo de cambios de polaridad.

En la Figura 4.1 se pueden observar los primeros instantes de la polarización positiva de la muestra (inyección de carga espacial en el medio XLPE-electrodo). A los 30 s en los que se desconecta la fuente DC, se observa la disminución paulatina de carga en los electrodos, esto es el fenómeno de despolarización o reordenación de dipolos eléctricos. La carga residual que aparece en las interfaces del aislante con ambos electrodos es visible porque la excitación de la fuente de tensión pulsante está conectada, por lo que la carga acumulada reacciona con interacción mecánica a los pulsos de tensión.

Después de desconectar la fuente de tensión pulsante a los 70 s, la muestra queda sin ningún tipo de excitación capaz de provocar desplazamiento de cargas; por tanto, el nivel de carga eléctrica detectada pasa a ser cero. Al volver a conectar la fuente de tensión pulsante, a los 100 s, se sigue observando una cantidad de carga residual ligeramente inferior a la medida antes de la desconexión de la tensión pulsante (ver Figura 4.2). Esto da a entender que el proceso de despolarización ha seguido su curso.

Al conectar la fuente DC a los 130 s con polaridad inversa (-10 kV), la muestra se polariza negativamente, y el nivel de carga observado en ambos electrodos disminuye, aunque no llega a ser tan grande como el nivel de carga observado con la polaridad positiva (ver Figura 4.2). Éste fenómeno puede deberse a numerosos factores, tales como la recombinación de las cargas atrapadas previamente a la inversión de la polaridad ([Chen, 2004]), o la asimetría entre los electrodos (tanto la geometría como los materiales de contacto son diferentes).

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

Por último al desconectar la fuente DC con polaridad negativa, a los 170 s, continúa apareciendo exactamente el mismo nivel de carga residual procedente de la polarización con tensión positiva. Es claro que ese nivel de tensión continua positiva es capaz de dejar carga acumulada en la interfaz electrodo-aislante.

En las figuras 4.2 y 4.3 se muestra con más detalle cómo evoluciona la carga acumulada en la interfaz de los electrodos con la muestra para los cambios realizados a lo largo del tiempo tales como: desconexión de la fuente DC (despolarización), desconexión de los pulsos de tensión y cambios de polaridad de la carga acumulada en la muestra a través del cambio de polaridad de la fuente.



Figura 4.2.- Evolución de la carga a 0 mm, en la interfaz del electrodo positivo con la muestra.

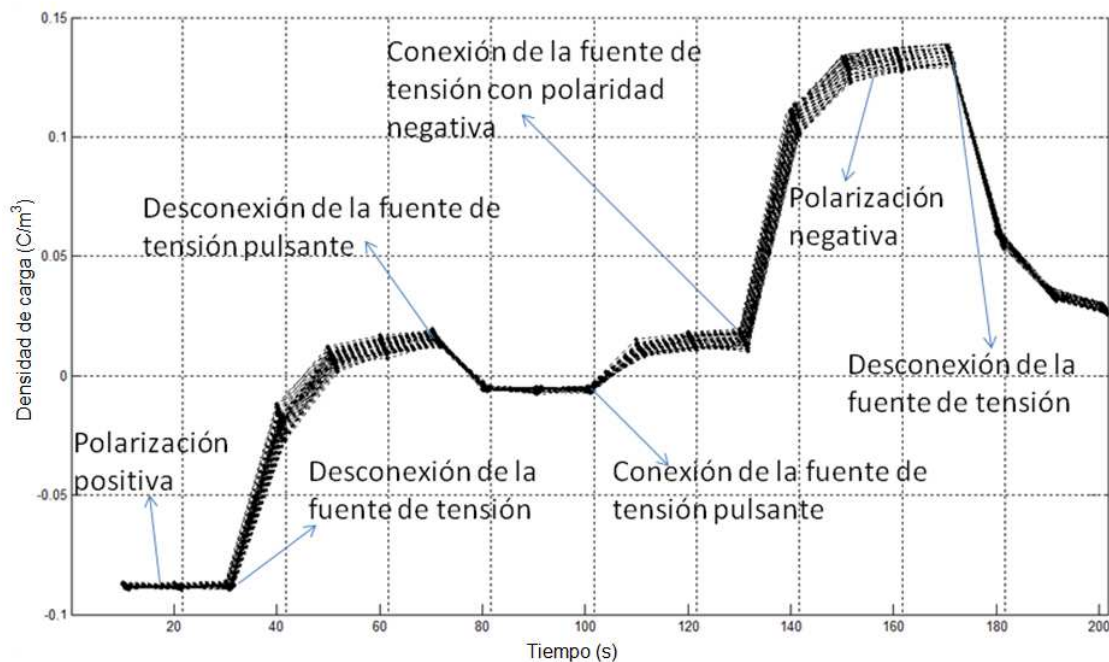


Figura 4.3.- Evolución de la carga a 0,15 mm, en la interfaz del electrodo negativo con la muestra.

4.1.2.- Cambios de polaridad sin desconectar la fuente de tensión pulsante.

La Figura 4.4 muestra un ensayo similar al anterior con la salvedad de que la fuente de tensión pulsante no se desconecta en ningún momento. La tensión aplicada a la muestra de 0,15 mm es de 10 kV tanto para tensión positiva como para la tensión negativa. La descripción del ensayo reflejado en la Figura 4.4 es la siguiente:

- Los primeros instantes en la muestra permanecen aplicados la fuente de tensión de corriente continua con polaridad positiva (10 kV).
- A los 50 s se desconecta la fuente de tensión con la polaridad positiva.
- A los 100 s de ensayo se conecta la fuente de tensión con polaridad negativa (-10kV).
- A los 150 s se desconecta la fuente de tensión con la polaridad negativa.
- A los 200 s se vuelve a conectar la fuente de tensión con polaridad positiva (10 kV).

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

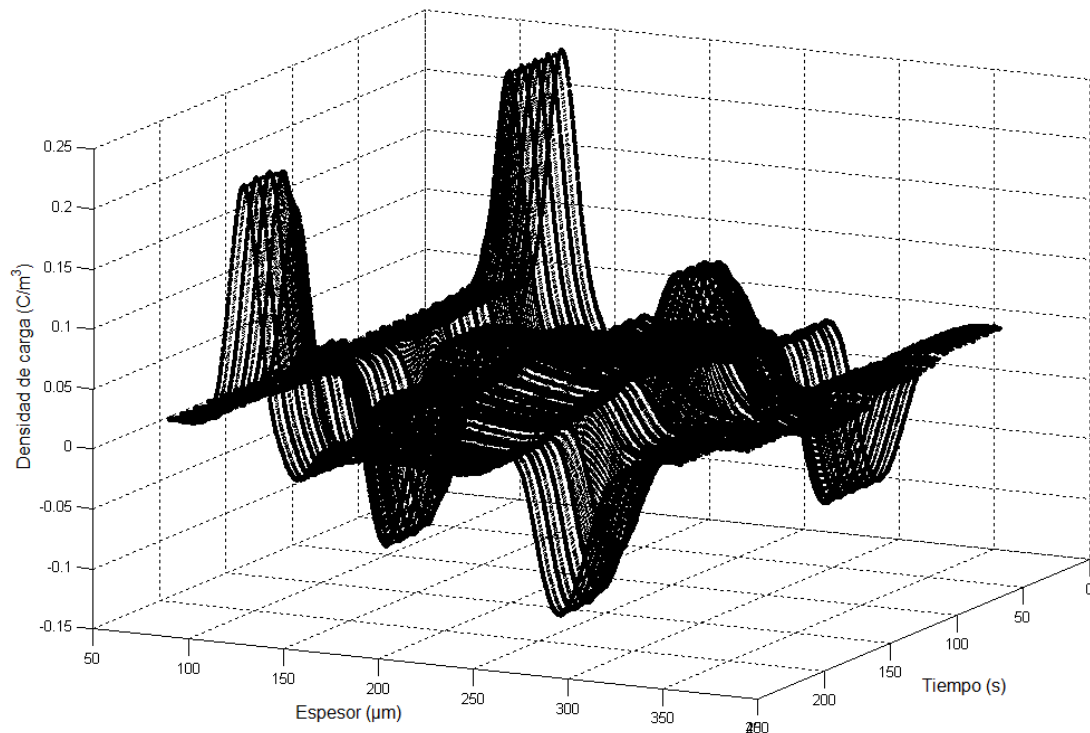


Figura 4.4.- Evolución de la carga en el ensayo de cambios de polaridad.

Detalle de una despolarización.

La Figura 4.5 muestra la evolución de la carga en la muestra de XLPE de 0,15 mm tras desconectar la fuente de tensión de corriente continua, que se encontraba a 10 kV.

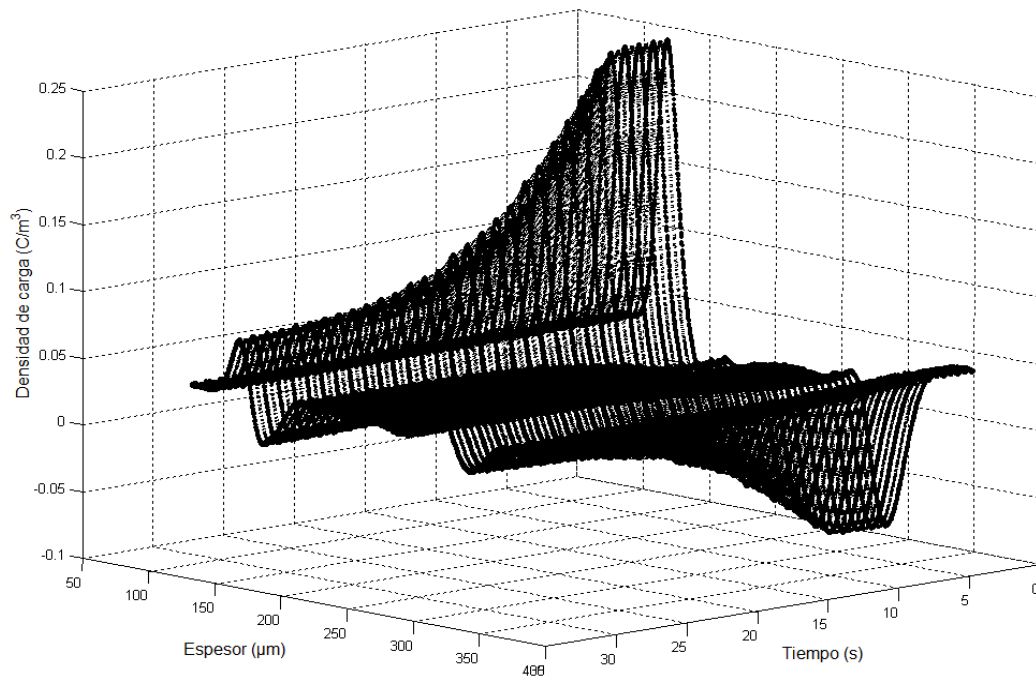


Figura 4.5.- Detalle despolarización en la lámina de XLPE de 0,15mm para una tensión de 10kV.

4.1.3.- Comentarios.

La carga que aparece junto a los electrodos cambia de polaridad cuando cambia la polaridad de la tensión aplicada, debido a la inyección de carga producida por los electrodos. Debido a ello cada vez que se invierte la polaridad de la fuente de tensión de corriente continua, el tipo de carga inyectada desde un electrodo también cambia de polaridad.

Se puede observar en la despolarización de una muestra (Figura 4.5) que la constante de tiempo de descarga para este material es de unos 5 s. Para tiempos superiores a 10s todavía queda carga apreciable cerca de los electrodos. La carga residual que no se elimina tras dejar de aplicar tensión es un fenómeno común en láminas de polietileno. Concretamente, en láminas de XLPE envejecidas (a 45kV/mm durante 100h), se mantiene más del 80% de su carga inicial tras 1000s de despolarización ([Mazzanti, 2003]). Como se ha mencionado anteriormente, la curva que representa la cantidad de carga frente al tiempo de despolarización, determina la degradación sufrida por el material por previos procesos de envejecimiento.

En la polarización negativa de la muestra la carga que se inyecta en ambos electrodos resulta ser inferior a la que se aparece cuando la muestra estaba polarizada positivamente. El fenómeno puede ser causa de cierta asimetría entre los electrodos (ya que uno tiene semiconductor y el otro no), recombinación de cargas acumuladas en el proceso de polarización previo (neutralización), etc. En la Figura 4.6 se puede ver la diferencia de carga acumulada cuando la polaridad cambia.

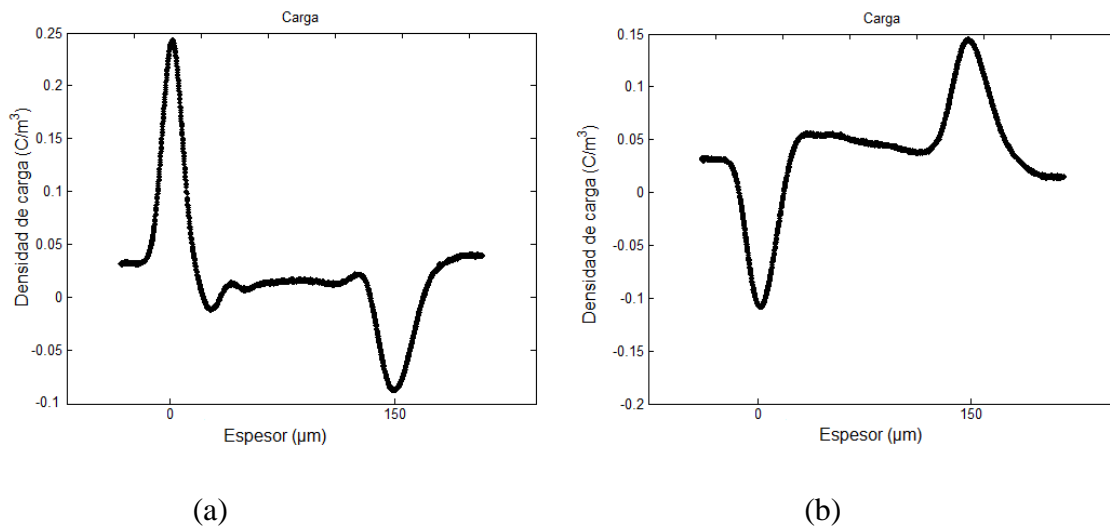


Figura 4.6.- Perfiles de carga acumulada para una tensión de: (a) polarización positiva (10 kV), (b) polarización negativa (-10 kV).

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

En la Figura 4.6 (a) se puede ver la aparición de un cúmulo de carga espacial junto al electrodo positivo, cosa que no sucede al revertir la polaridad. Ese cúmulo de carga procede de cargas liberadas por la existencia de una imperfección química ó física.

En la Figura 4.7 se observa la evolución de la carga espacial acumulada con el modelo tridimensional y la tendencia del máximo valor de campo eléctrico total detectado (el generado por la tensión aplicada y el inducido por la distribución de carga espacial). para el ensayo de cambio de polaridad de la sección 4.1.1. Los cambios realizados a lo largo del ensayo son señalados en el modelo tridimensional (Figura 4.7 arriba) que muestra en el eje horizontal la evolución de los ficheros equivalente a la evolución del tiempo, en el eje vertical el espesor de la muestra y un modelo con una escala de colores que indica niveles de carga. En la tendencia del máximo valor de campo eléctrico detectado (Figura 4.7 abajo), el eje horizontal representa el tiempo en segundos, y el eje vertical el valor de campo eléctrico. Se pueden ver los cambios de polaridad en la carga, el tiempo sin aplicar tensión pulsante en el ensayo, y la tendencia del campo eléctrico para cada caso.

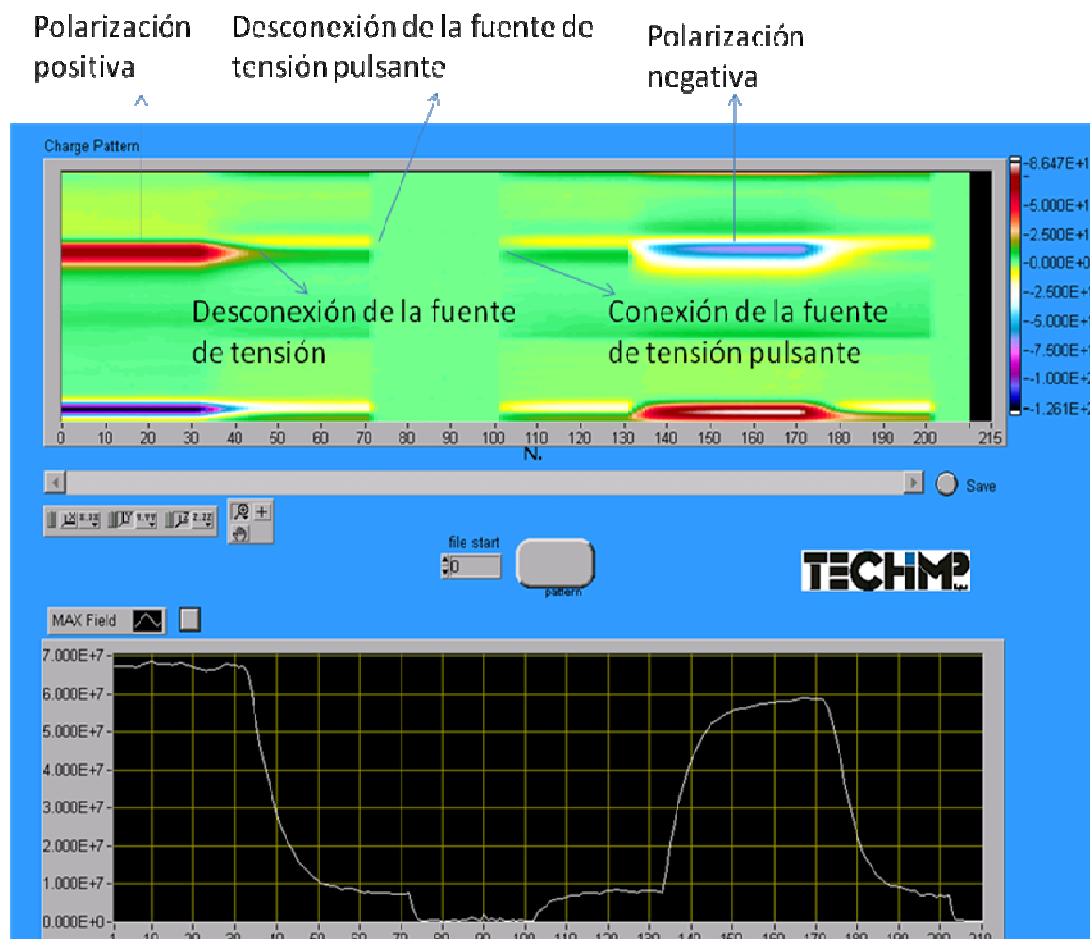


Figura 4.7.- Evolución tridimensional de la carga acumulada (arriba) y del campo eléctrico (abajo), para el ensayo de cambio de polaridad de la sección 4.1.1.

4.2.- Ensayos de envejecimiento del aislante.

En estos ensayos siempre será objeto de estudio la misma muestra de XLPE de 0.15mm, sometida a un nivel de tensión fijo durante un tiempo. En cada ensayo se incrementa el nivel de tensión aplicado a la muestra con el fin de observar el comportamiento de la carga espacial en el tiempo para determinados niveles de tensión. La finalidad es observar la evolución de la carga espacial en el aislante a lo largo del tiempo y si este sufre alguna degradación interna debido a los esfuerzos dieléctricos provocados por la tensión continua y el fenómeno de inyección y aparición de carga.

4.2.1.- Envejecimiento a 4 kV durante 3h.

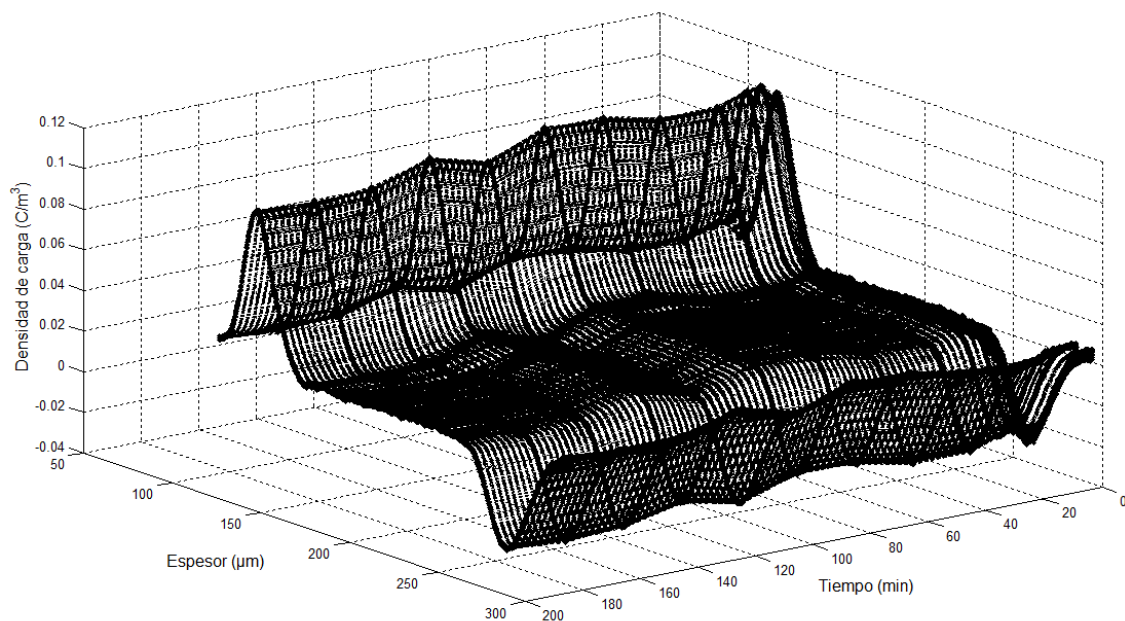


Figura 4.8.- Evolución del perfil de carga para una tensión de 4kV durante 3h.

Con la tensión de 4 kV la carga no presenta ningún comportamiento dinámico, salvo una ligera fluctuación a los 100 minutos. En el instante inicial comienza la inyección de carga en los electrodos y la polarización del aislante. Se puede decir que el aislante se comporta de manera adecuada para este nivel de tensión, ya que no se aprecia aparición de carga interna ni inyección de carga desde los electrodos hacia el interior.

4.2.2.- Envejecimiento a 8 kV durante 3h.

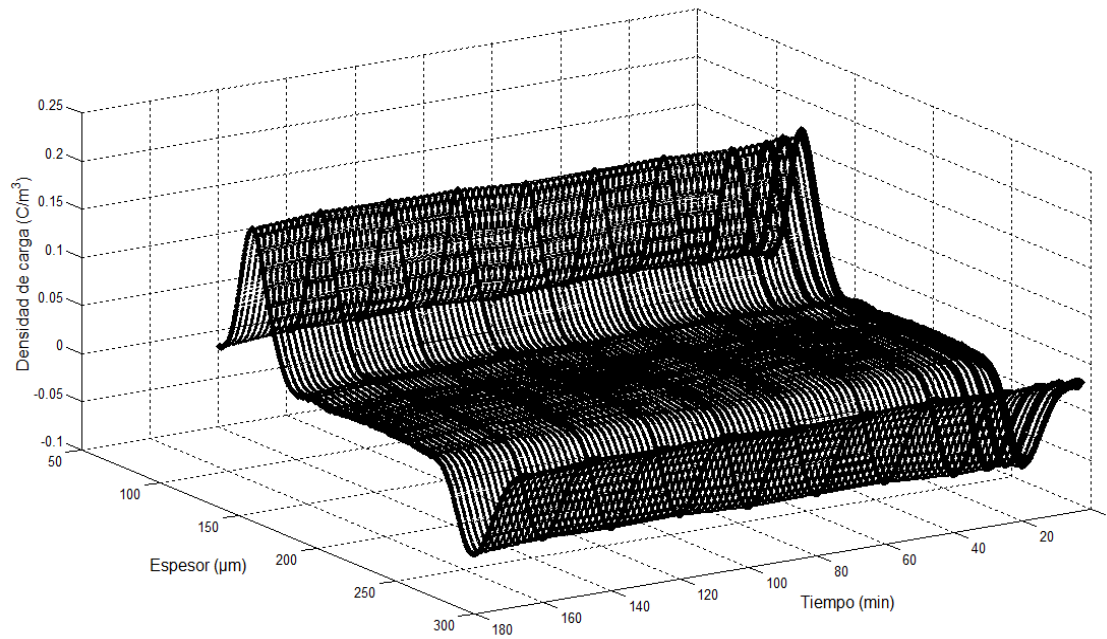


Figura 4.9.- Evolución del perfil de carga para una tensión de 8kV durante 3h.

En la Figura 4.9 se observa en los primeros instantes el fenómeno de la inyección de carga en el medio electrodo-XLPE. Posteriormente no se aprecia ningún comportamiento dinámico de la carga, el perfil permanece constante durante todo el tiempo. No se aprecia ninguna aparición de carga espacial interna.

4.2.3.- Envejecimiento a 12 kV durante 3h.

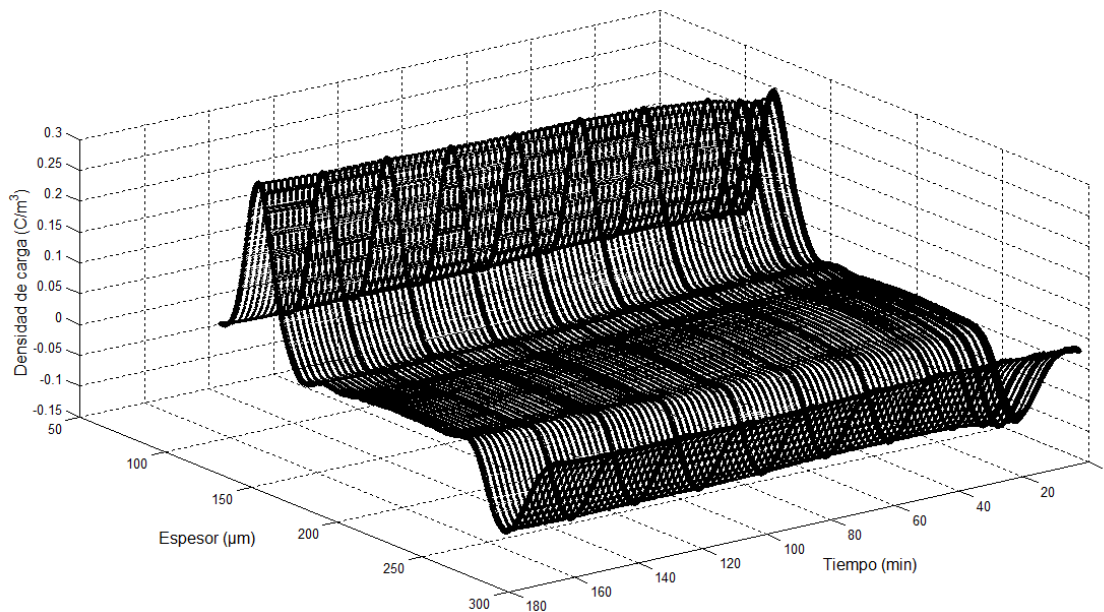


Figura 4.10.- Evolución del perfil de carga para una tensión de 12kV durante 3h.

En la Figura 4.10 sigue destacándose la inyección de carga en los electrodos en los primeros minutos de tiempo.

Se aprecia una pequeña inyección de carga al interior de la muestra, un pequeño lóbulo de carga cercano al electrodo positivo. Esa aparición de carga se debe a la variabilidad de la conductividad en esa zona de la muestra; este fenómeno surge por la aparición de carga atrapada en pozos de potencial cuya profundidad hace que sólo sea visible a grandes tensiones. La zona en la que se encuentra el paquete de carga corresponde con un lugar donde la conductividad es superior a la conductividad del resto de la muestra. Si la conductividad es grande esa posición será un lugar favorable para la aparición y acumulación de carga espacial ([Matsui, 2005]). En la Figura 4.11 se puede ver con mejor detalle el crecimiento de éste cúmulo de carga con el tiempo.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

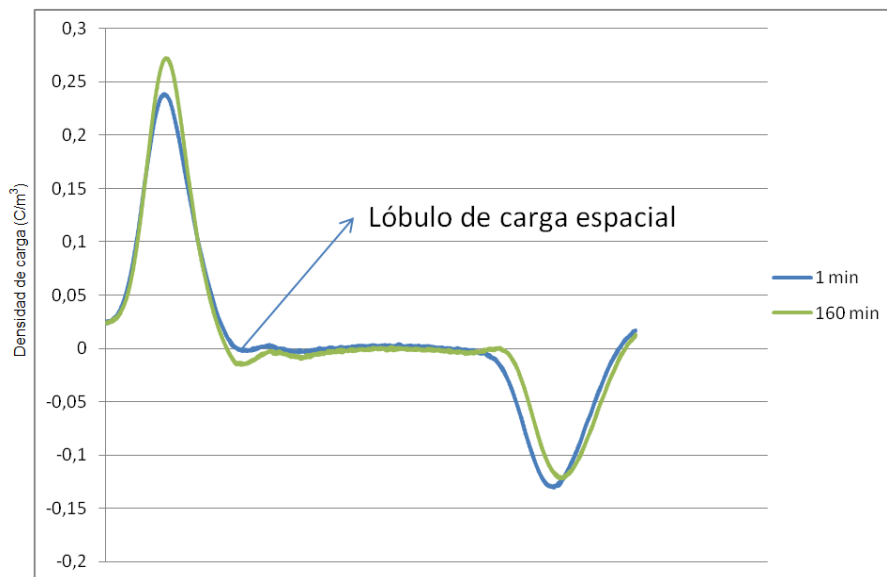


Figura 4.11.- Lóbulo de carga observado cerca del electrodo positivo.

4.2.4.- Envejecimiento a 16 kV durante 3h.

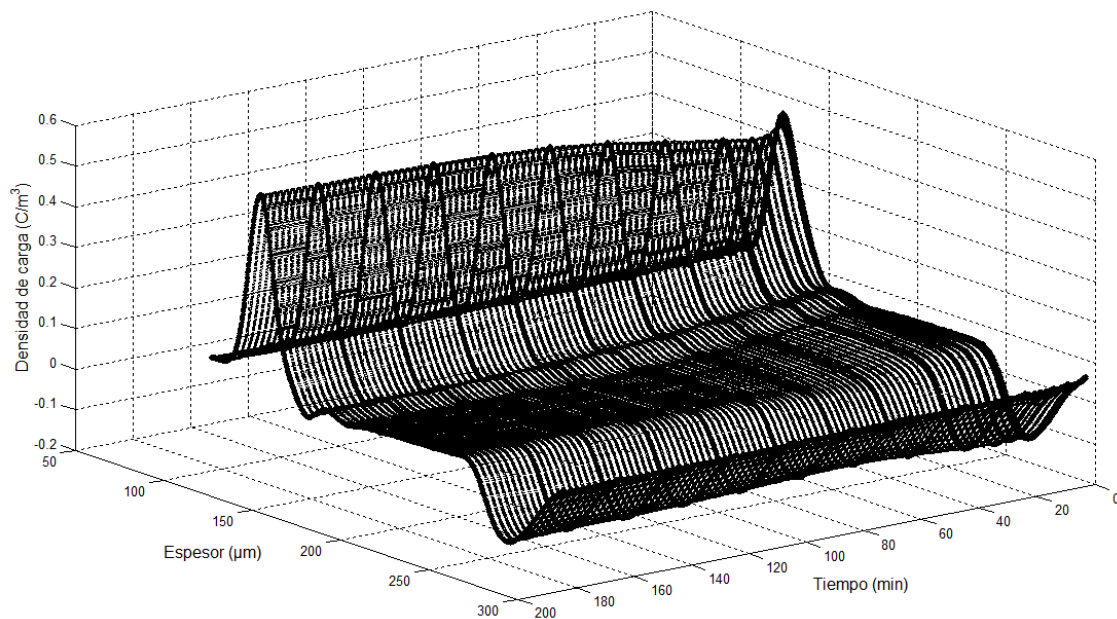


Figura 4.12.- Evolución del perfil de carga para una tensión de 16kV durante 3h.

En la Figura 4.12 se observa el fenómeno de la inyección de carga en la unión electrodo-XLPE durante los primeros instantes de aplicar tensión. También se puede observar el lóbulo de acumulación de carga cercano al electrodo positivo de mayor

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

magnitud que el detectado para 12kV; tal y como se verá más adelante, esto indica un aumento en la conductividad en esa posición (ver Figura 4.13).

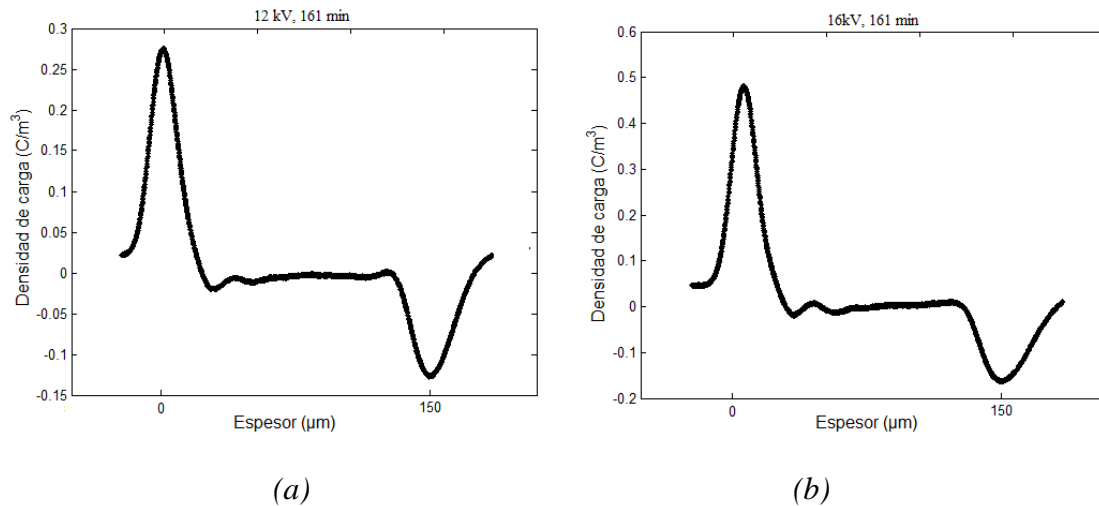


Figura 4.13.- Perfiles de carga a los 161 minutos del ensayo para: (a) 12 kV y (b) 16 kV.

En la Figura 4.13 también se puede ver el aumento de la densidad de carga en los electrodos cuando se aumenta el nivel de tensión.

4.2.5.- Envejecimiento a 18 kV durante 3h.

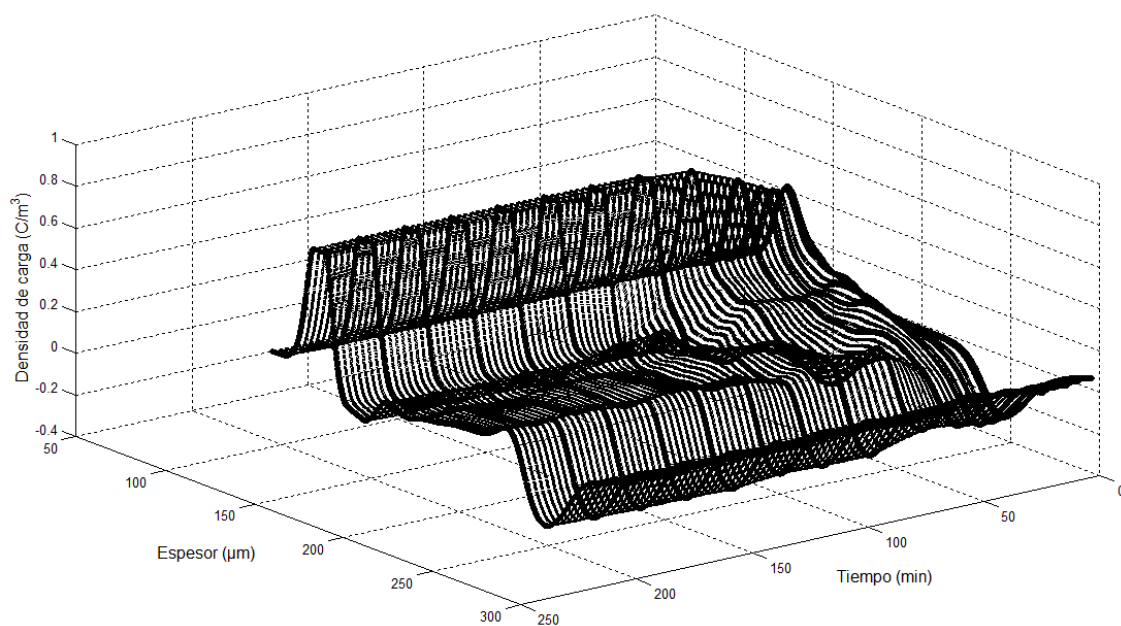


Figura 4.14.- Evolución del perfil de carga para una tensión de 18kV durante 3h.

Para los 18 kV de tensión (Figura 4.14) se puede observar muy bien un comportamiento dinámico de la distribución de carga espacial durante los 100 primeros minutos de ensayo. Las cargas que aparecen en el interior del aislante proceden de la inyección desde los electrodos, de la ionización de impurezas existentes en el seno del material y de cargas liberadas de pozos de potencial profundos. Las cargas intrínsecas están fuertemente influenciadas por las imperfecciones químicas en el aislante, tales como impurezas, subproductos de la reacción de reticulado, antioxidantes, etc; ([Takada, 1999]). Las cargas atrapadas en pozos de potencial se mueven en el interior del aislante moviéndose de uno a otro (con mayor probabilidad conforme el nivel de tensión sea mayor), hasta estabilizarse en una zona de equilibrio adecuada en que la tensión aplicada no pueda liberarla. Tal y como se mencionará más adelante, esto aumentará la conductividad eficaz de la muestra en determinadas zonas de su espesor. A partir de los 100 minutos la carga eléctrica deja de moverse por el seno del aislante, deja de inyectarse carga desde los electrodos y también deja de aparecer la carga atrapada en pozos de potencial en el seno del material.

En la Figura 4.14 es destacable cómo en el electrodo positivo la gráfica está “recortada”, lo que se debe a un error común en el uso de ésta técnica producido por no ajustar la escala de medida del osciloscopio conforme pasa el tiempo de monitorización. Esto supone un error de saturación que puede ser corregido aumentando la escala de medida hasta observar el perfil correctamente. En la Figura 4.18 del siguiente ensayo ya no se observa ese error porque se aumentó la escala del osciloscopio. No obstante, hay que indicar que la información de la carga inyectada por los electrodos no es esencial para interpretar el comportamiento del aislamiento en este ensayo, pues es la carga acumulada en su volumen y las distorsiones de campo que producen, el problema de mayor interés a estudiar.

También se sigue observando el lóbulo de carga próximo al electrodo positivo, pues es la misma muestra en todos los ensayos y por lo tanto sus características no varían. En todo caso, se puede confirmar que la cantidad de carga en el lóbulo se incrementa cuando la tensión aumenta.

En la Figura 4.15 se observa el aumento de la magnitud de carga acumulada con el aumento del nivel de tensión. También se puede observar cierta tendencia de la muestra a acumular heterocarga próxima a los electrodos a medida que avanza el tiempo y aumenta la tensión. Ésta heterocarga reduce el valor de campo eléctrico del interior de la muestra con el inconveniente de que en los electrodos éste queda intensificado; por tanto, será más factible la degradación de la muestra en zonas próximas a los electrodos.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

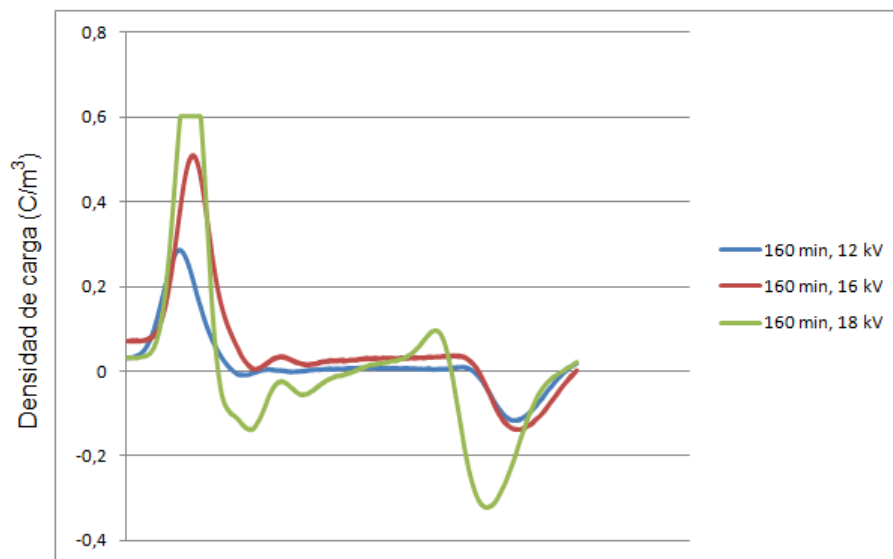


Figura 4.15.- Evolución del perfil de carga para distintas tensiones a los 160 minutos.

En la Figura 4.16 se puede observar con mayor detalle el transporte un lóbulo intermedio de carga positiva viajando de ánodo a cátodo, durante los primeros minutos de este ensayo. La carga que se transporta lo hace de una trampa de potencial a otra, en el proceso de atrapamiento-liberación de cargas (“trapping and detrapping”), atravesando el grosor de la muestra hasta llegar al electrodo opuesto.

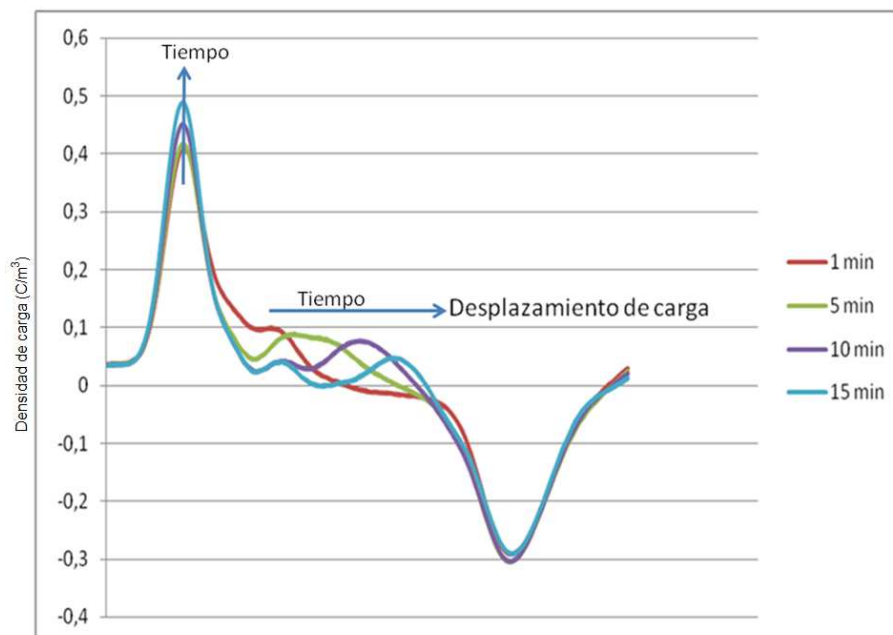


Figura 4.16.- Transporte de carga positiva desde el ánodo hasta el cátodo para los primeros 15 minutos del envejecimiento a 18 kV.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

La Figura 4.17 muestra perfiles de carga para determinados instantes posteriores al transporte del paquete de carga positivo observado en la Figura 4.16 del ensayo de envejecimiento a 18 kV de tensión. Se puede observar el fenómeno de transporte de carga, pero en este caso, carga negativa viajando desde el cátodo hasta el ánodo atravesando el interior de la masa del aislamiento. Comparando ambas figuras (4.16 y 4.17) también se observa cómo el transporte de carga negativa es un proceso más lento que el transporte de carga positivo; mientras que la carga positiva tarda unos 15 minutos en atravesar la muestra, la negativa lo hace en 60 minutos. A los 80 minutos el perfil queda prácticamente estable, tras haberse acumulado cierta cantidad de heterocarga próxima a los electrodos en ambos lados del aislante.

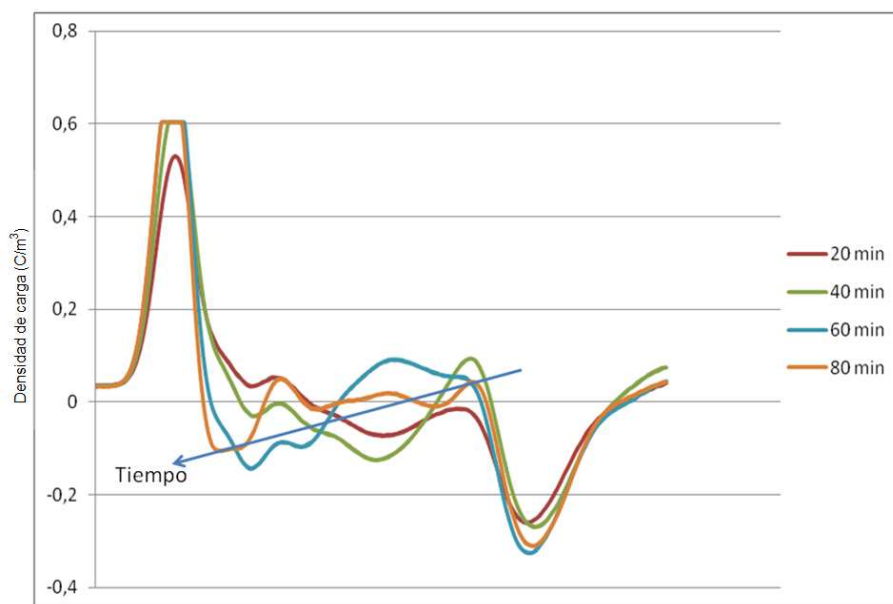


Figura 4.17.- Transporte de carga negativa desde el cátodo hasta el ánodo con 18 kV de tensión aplicada.

4.2.6.- Envejecimiento a 20 kV durante 3h.

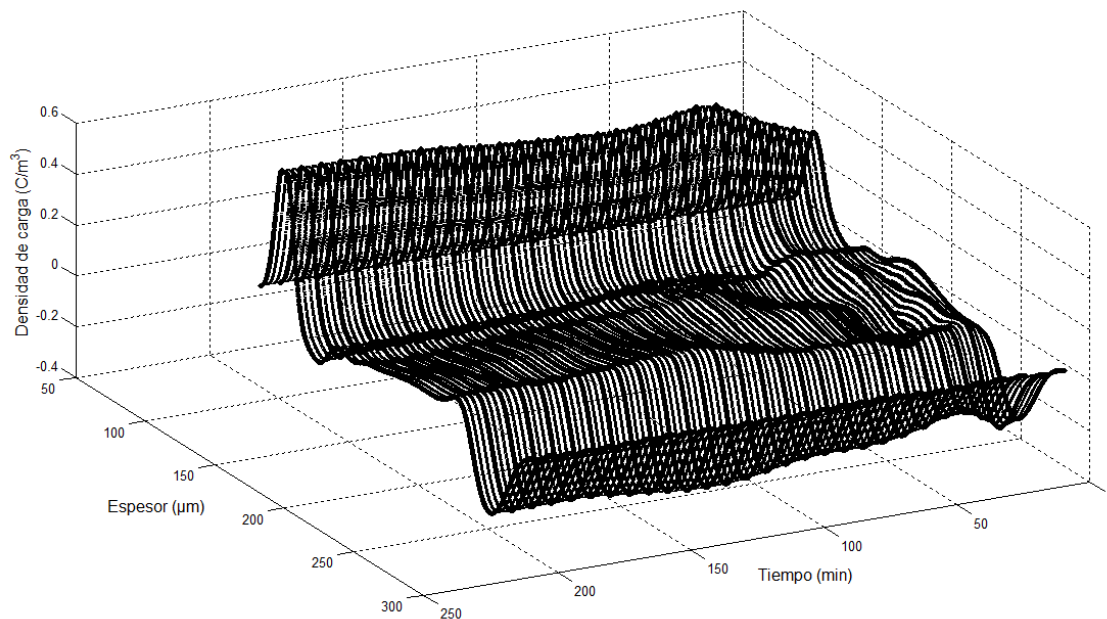


Figura 4.18.- Evolución del perfil de carga para una tensión de 20kV durante 3 horas.

En la Figura 4.18 se puede observar perfectamente la aparición intermitente de paquetes de carga hasta aproximadamente 100 minutos del ensayo. Tal y como se comentó anteriormente, esta carga se mueve a lo largo de la muestra a través de los caminos de conductividad no cero caracterizados por una sucesión de pozos de potencial que pueden ser superados por la elevada tensión aplicada. La movilidad de la carga desaparece aproximadamente a los 100 minutos, donde el perfil se regulariza, ya no se da la inyección de carga desde los electrodos y tampoco se libera más carga atrapada.

Se puede confirmar que a medida que se aumenta la tensión en los ensayos se favorece la aparición de carga que puede existir en la masa de la muestra. A mayor tensión la carga atrapada emerge con mayor facilidad y se inyecta mayor cantidad de carga desde los electrodos.

Para reducir este factor de aparición de carga espacial en aislantes sometidos a altas tensiones, en la fabricación del aislante se pueden aplicar procesos para evitar aparición de imperfecciones químicas y físicas, como por ejemplo la desgasificación del material. Se ha demostrado que la carga que se acumula en un aislante desgasificado (ausencia de vacuolas de gas) es inferior a la carga que puede aparecer cuando el aislante no se encuentra desgasificado para el mismo nivel de tensión ([Sanden, 1997]).

La Figura 4.19 muestra con más detalle cómo durante los primeros 100 minutos se produce la aparición de los paquetes de carga, y el desplazamiento de la carga observado en la Figura 4.18.

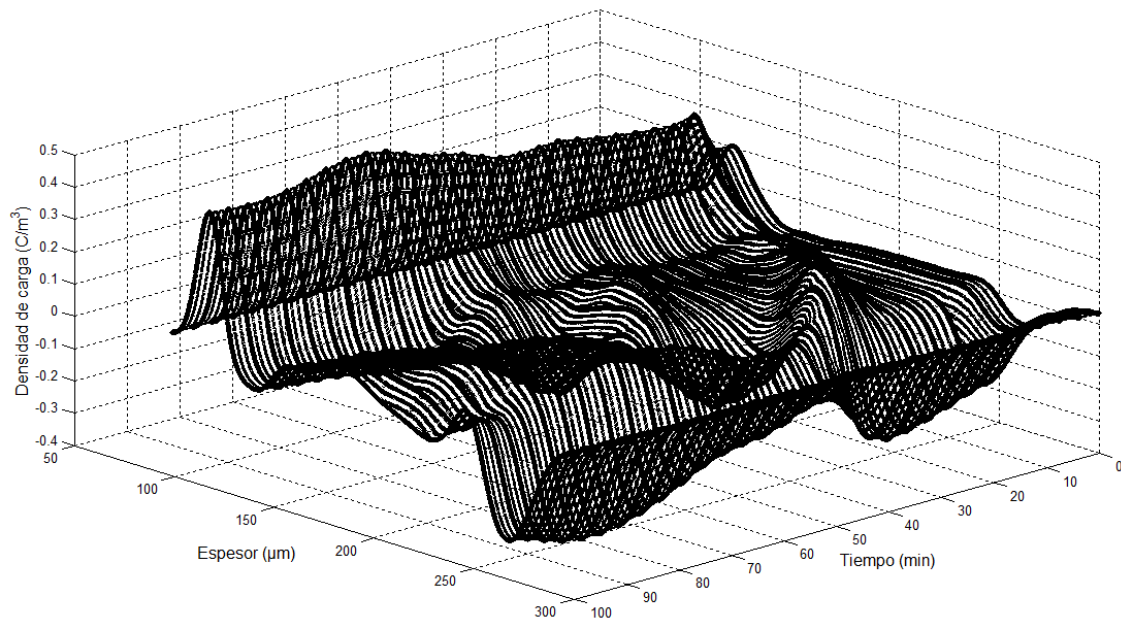


Figura 4.19.- Detalle de la evolución del perfil de carga a 20kV durante los 100 primeros minutos.

En la Figura 4.20 se puede observar con mayor detalle el transporte de un lóbulo intermedio de carga positivo durante los primeros minutos del ensayo, debido al proceso de atrapamiento-liberación de cargas (“trapping and detrapping”). El lóbulo atraviesa el grosor de la muestra viajando de ánodo a cátodo. Este fenómeno es similar al sucedido en el ensayo a 18 kV (ver Figura 4.16), salvo que la cantidad de carga transportada es mayor cuanto mayor es el nivel de tensión del ensayo (comparando Figura 4.16 y Figura 4.20). Por otro lado el tiempo que tarda en atravesar la muestra este cúmulo de carga es ligeramente superior con 20 kV que con 18 kV.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

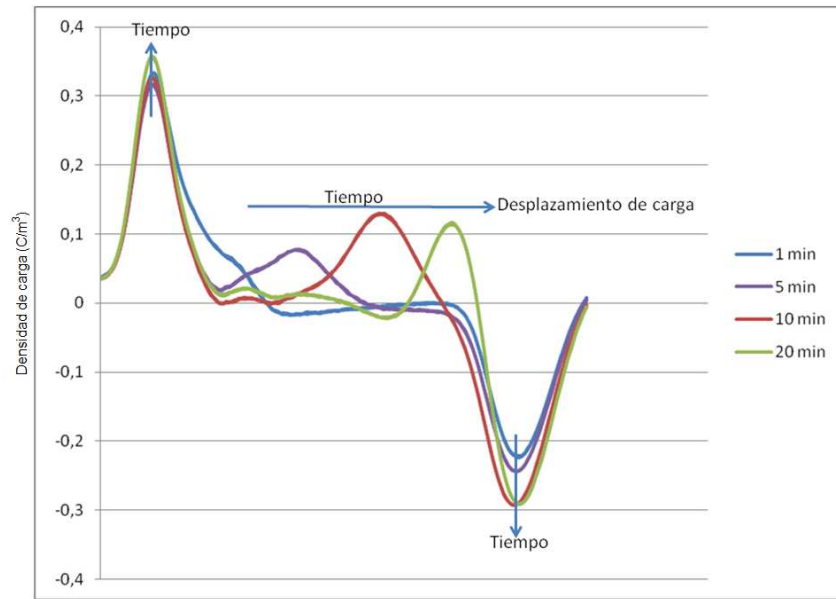


Figura 4.20.- Transporte de carga positiva desde el ánodo hasta el cátodo para los primeros 20 minutos del envejecimiento a 20 kV.

También sucede lo mismo que en el ensayo anterior: después de un transporte de carga positivo ocurre un transporte de carga negativo. La Figura 4.21 muestra perfiles de carga para determinados instantes posteriores al transporte del paquete de carga positivo observado en la Figura 4.20 para el ensayo de envejecimiento a 20 kV de tensión. Se puede observar el fenómeno de transporte de carga, pero en este caso, carga negativa viajando desde el cátodo hasta el ánodo atravesando el interior de la masa del aislamiento; y al igual que en el ensayo anterior (18kV), es un proceso más lento que el transporte de carga positiva. A los 80 minutos el perfil queda prácticamente estable, tras haberse acumulado una cierta cantidad de heterocarga en el aislante.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

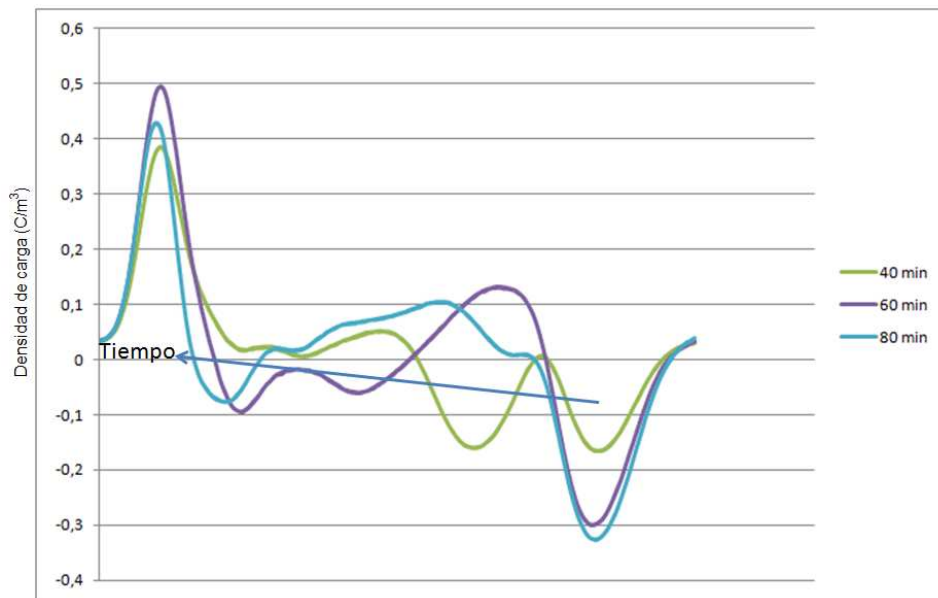
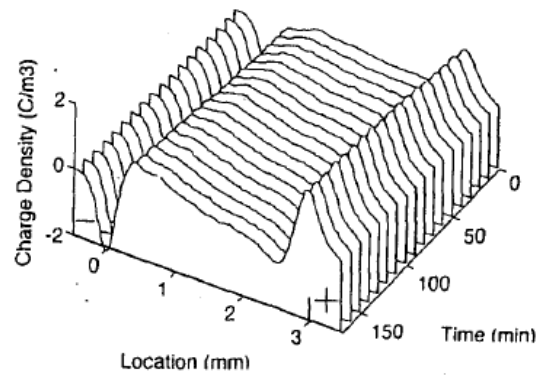


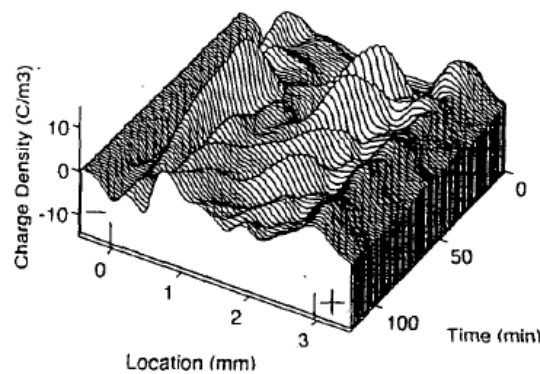
Figura 4.21.- Transporte de carga negativa desde el cátodo hasta el ánodo con 20 kV de tensión aplicada.

La Figura 4.22 muestra la evolución de la carga espacial observada con el método PEA por otro autor ([Takada, 1999]) en una muestra de XLPE de 3 mm de grosor cuando se aplica una tensión de 70 kV, lo que en la muestra de 0,15 mm empleada en este trabajo sería equivalente a aplicar una tensión de 3,5 kV, Figura 4.22 (a). En la figura se puede observar una acumulación de carga en los alrededores de ambos electrodos, similar al ensayo de envejecimiento a 4 kV con la muestra de 0,15 mm (ver Figura 4.8). En este mismo trabajo, cuando la tensión aplicada es de 350 kV (117 kV/mm; en el ensayo a 20 kV de tensión aplicados a la muestra de 0,15 mm el campo eléctrico es de 133,3 kV/mm), como se muestra en la Figura 4.22 (b), aparecen paquetes de carga intermitentemente que se mueven hacia el electrodo opuesto a su polaridad; el perfil de carga espacial tiende a estabilizarse en aproximadamente 150 minutos. Como se puede apreciar, para un mismo tipo de material, los fenómenos observados en este trabajo guardan mucha similitud –al menos, en orden de magnitud- con los presentados por otros autores de referencia en términos de umbral de campo de aparición de carga espacial intrínseca y tiempo de estabilización de perfiles de carga.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.



(a) 70kV (0.23MV/cm)



(b) 350kV (1.2MV/cm)

Figura 4.22.- Evolución de la carga espacial en una muestra de XLPE de 3 mm de grosor para diferentes tensiones: (a) 70 kV y (b) 350 kV, ([Takada, 1999]).

La medida del campo eléctrico umbral por encima del cual se acumula carga espacial intrínseca en el volumen de la muestra es una característica de gran interés para estimar el grado envejecimiento de la misma debido al ciclo de trabajo al que fue sometida previamente ([Mazzanti, 2003]).

4.2.7.- Envejecimiento a 16 kV durante 13h.

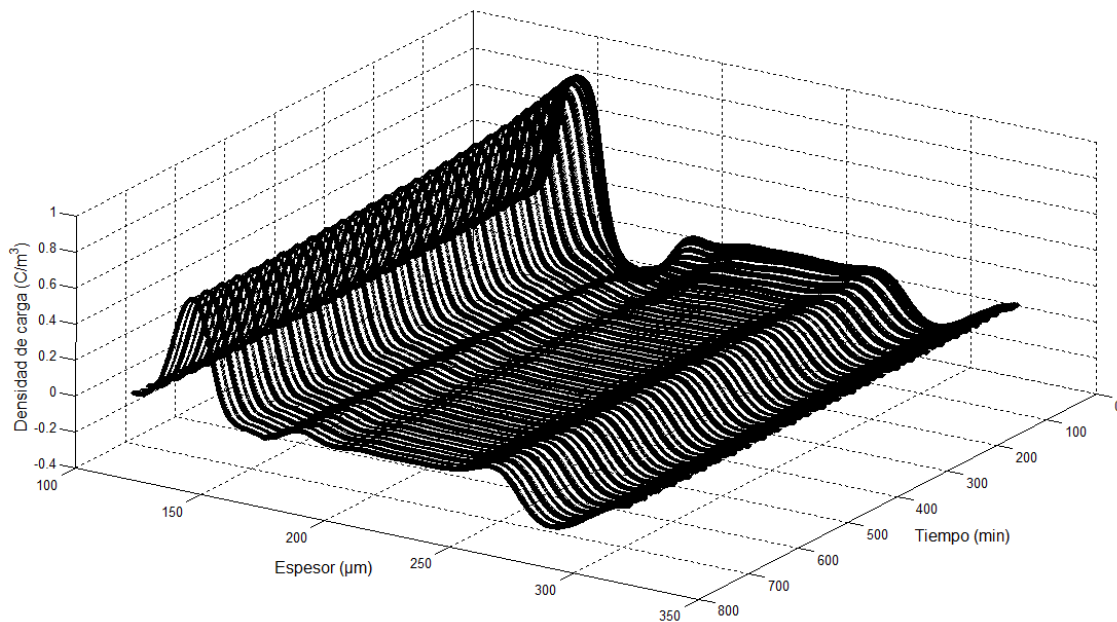


Figura 4.23.- Evolución del perfil de carga para una tensión de 16 kV durante aproximadamente 13 horas.

Se observa en los primeros minutos una acumulación de heterocarga cercana al electrodo positivo fruto de la acumulación de carga procedente del ensayo anterior que quedó atrapada en una barrera de potencial. Las figuras 4.24 y 4.25 comparan el perfil del ensayo de envejecimiento a 20 kV para las tres horas del ensayo (último perfil adquirido, Figura 4.18), y el primer perfil adquirido en el envejecimiento a 16 kV de tensión. En estos perfiles se puede ver esta acumulación de heterocarga debida al ensayo anterior a 20kV. En los ensayos de envejecimiento se usa la misma muestra y por tanto sufre una degradación paulatina que provoca esta aparición de carga espacial acumulada que, en ocasiones, no desaparece aunque el tiempo de despolarización sea muy elevado (ver sección 4.1). Pasados 100 minutos ese cúmulo de heterocarga desaparece y no se aprecia ninguna variación manteniéndose un perfil prácticamente constante durante todo el tiempo restante. La estabilización del perfil se explica por la ausencia de cargas liberables de pozos de potencial tras un periodo de tiempo tan prolongado.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

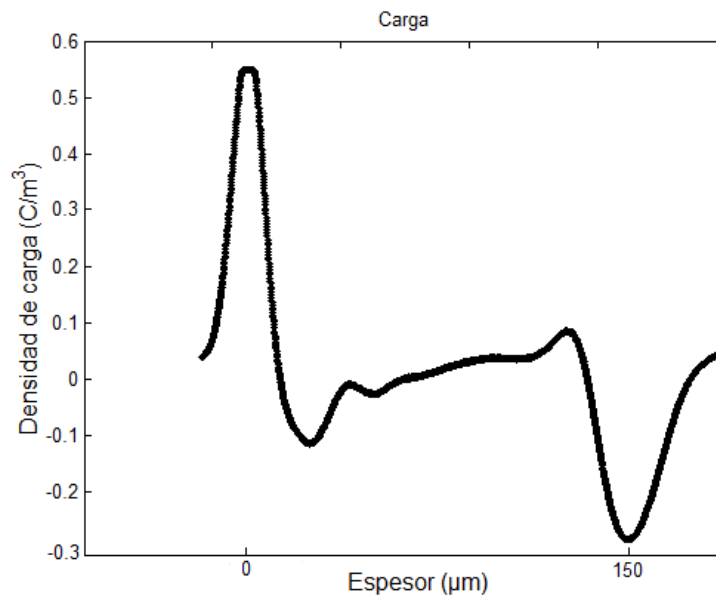


Figura 4.24.- Perfil de carga a las 3 horas del ensayo de envejecimiento a 20 kV.

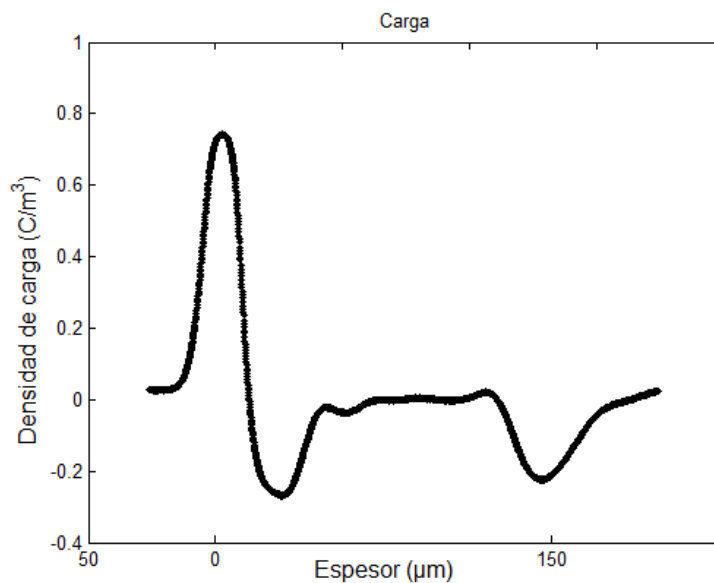


Figura 4.25.- Perfil de carga en el inicio del ensayo de envejecimiento a 16 kV durante 13 horas.

La Figura 4.26 muestra con mayor resolución el cambio visible más significativo del ensayo de 13 horas de envejecimiento a 16 kV: la disminución de la heterocarga que se acumula junto al electrodo positivo. También se observa cómo la carga en el electrodo positivo se reduce, por lo que se ha atribuido el fenómeno a la recombinación de cargas. La carga negativa que desaparece del lóbulo cercano al electrodo se neutraliza con la

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

carga positiva que ha sido inyectada por el electrodo, reduciendo la cantidad acumulada en éste. Esta reducción de carga negativa en cúmulo cercano al electrodo, y la reducción de la carga positiva del electrodo supone que la carga se desplaza desde el lóbulo negativo hasta el electrodo positivo durante ese tiempo, dando lugar a emisión fotónica no detectada en la celda opaca bajo estudio ([Chen, 2004]).

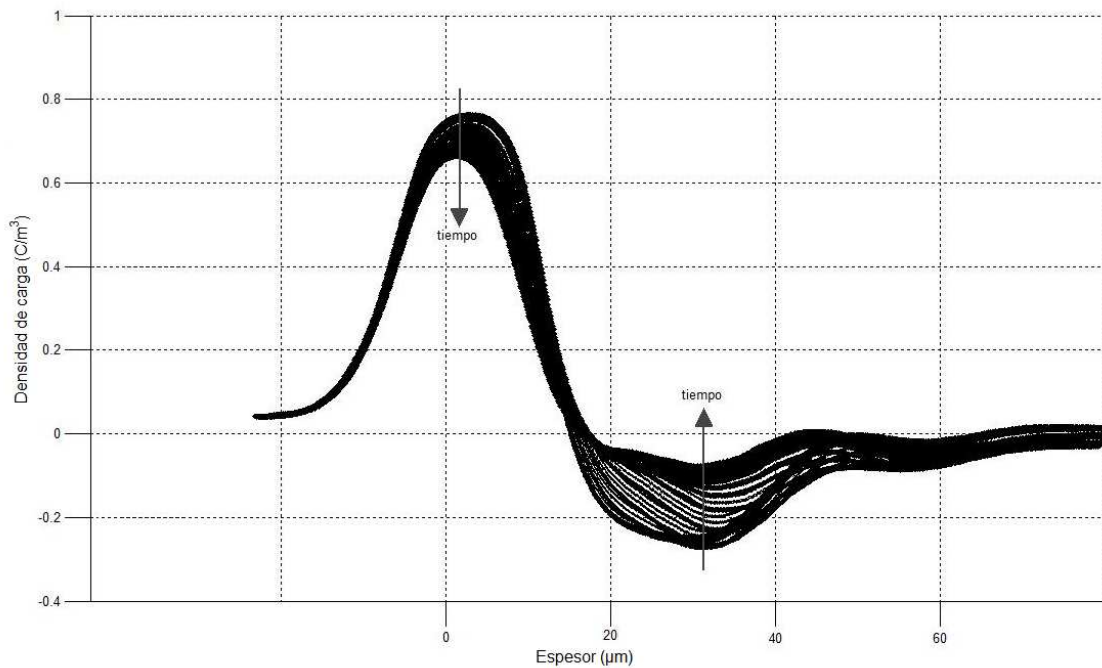


Figura 4.26.- Evolución de la heterocarga cercana al electrodo positivo durante los 100 primeros minutos.

Esta disminución del cúmulo de heterocarga originado en ensayos anteriores donde la tensión era superior (20 kV), permite argumentar que cierta cantidad de carga espacial que aparece en un aislante sometido a un alto nivel de tensión, puede desaparecer con el tiempo si se disminuye éste; en un proceso de recombinación de cargas.

4.2.8.- Comentarios.

La principal característica en los ensayos de envejecimiento es el comportamiento dinámico de la carga espacial que puede darse para determinados niveles de tensión. La movilidad de las cargas acumuladas debida al traspaso de éstas de pozo en pozo de potencial contribuye a una conductividad no nula en la muestra. La medida de los tiempos de tránsito de los paquetes de carga a lo largo de toda una muestra pueden ser utilizados como una primera aproximación para calcular la movilidad de los portadores en el material ([Mazzanti, 2003]) sin más que dividir la velocidad de desplazamiento de los mismos v_d entre la magnitud media de campo aplicado E : $\mu = v_d/E$.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

Tal y como se mencionó anteriormente, la acumulación de carga, en ciertos instantes, puede producir la ruptura del aislante, ya que la distorsión del campo creada por ella, puede superar al campo de ruptura del propio material. En la Figura 4.27 se puede observar la ruptura del aislante producida por el desplazamiento de la carga, visto para distintos niveles de campo eléctrico.

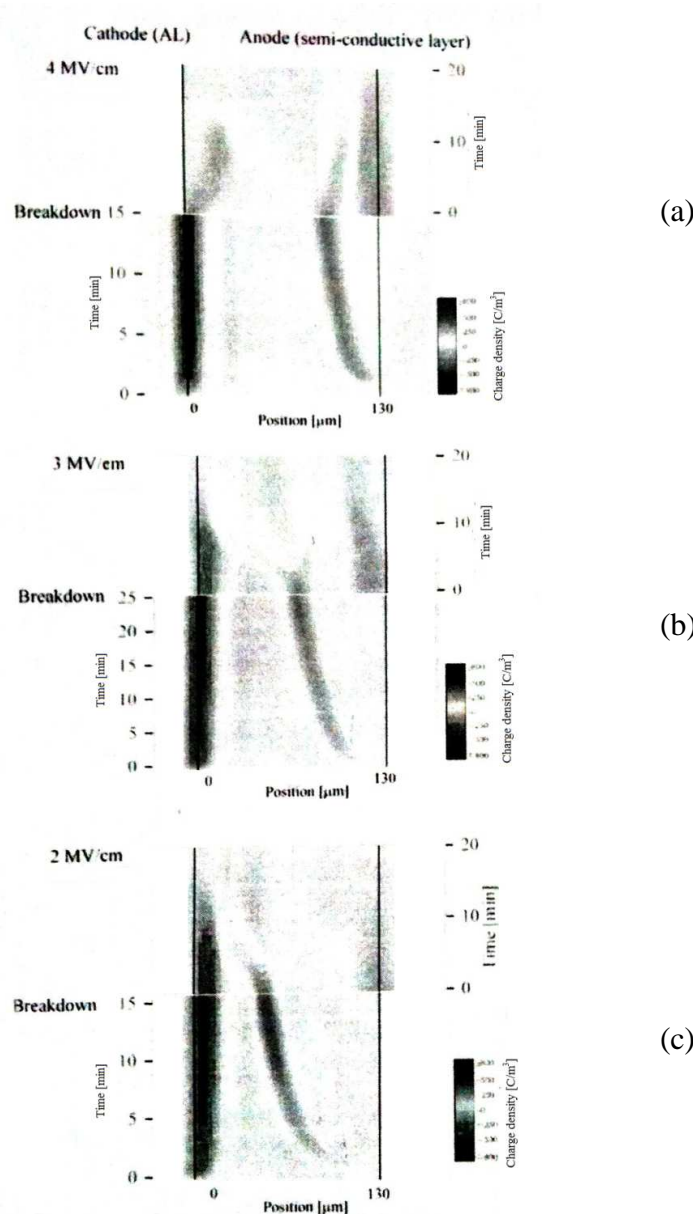


Figura 4.27.- Evolución de la carga espacial antes y después de la ruptura en una muestra de LDPE de 130 μm de espesor, bajo un campo aplicado de: (a) 4 MV/cm (400 kV/mm), (b) 3 MV/cm (300 kV/mm), (c) 2 MV/cm (200 kV/mm). ([Matsui, 2005]).

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

Cuando sucede la ruptura del material el circuito eléctrico es inmediatamente abierto por las protecciones (en Figura 4.27 imágenes a, b, c después de ruptura “breakdown”). Como se puede observar, el desplazamiento de la acumulación de carga a lo largo del material, da lugar a la ruptura del mismo, pues una carga de polaridad opuesta a la del electrodo, intensifica el campo en esa zona. Este fenómeno requiere de menos transporte de carga en el material para campos aplicados externos de mayor magnitud. El campo eléctrico sigue siendo alto debido a la existencia de gran cantidad de cúmulos de carga espacial en la masa del aislante incluso después de la ruptura. Las cargas se desplazan hacia el electrodo opuesto después de la ruptura, redistribuyendo la carga de manera más uniforme en el material.

Si la conductividad no es constante en la muestra, entonces existen posiciones en el interior de la misma favorables para la aparición de carga espacial y serán aquellas con mayor valor de conductividad. Matemáticamente se puede hacer una breve explicación.

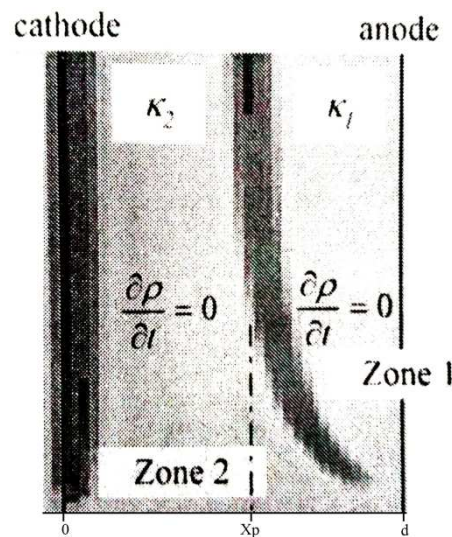


Figura 4.28.- Comportamiento típico de la carga espacial en una muestra.

Partiendo de la ecuación de continuidad en una dimensión, se relaciona a la densidad de corriente $j_c(x,t)$, y la distribución de carga espacial $\rho(x,t)$ para la muestra:

$$\frac{\partial j_c(x,t)}{\partial x} = -\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

La muestra es dividida en dos zonas en función de la posición del paquete de carga X_p . Las densidades de corriente de conducción en la zona 1 y 2 son j_{c1} y j_{c2} respectivamente. Cuando el paquete de carga se encuentra en la interfaz entre las dos zonas, la ecuación 1 se puede escribir de la siguiente forma:

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

$$\frac{j_{c1} - j_{c2}}{\Delta x} = -\frac{\partial \rho_p(x,t)}{\partial t} \quad (2)$$

En la posición Xp , la variación de ρ_p con el tiempo determina que:

$$j_{c1} > j_{c2} \quad (3)$$

La densidad de corriente de conducción es:

$$j_c = k \cdot E \quad (4)$$

Donde E el campo eléctrico, y k la conductividad. Aplicando la ecuación (4) a cada zona:

$$j_{c1} = k_1 \cdot E_1 \quad (5)$$

$$j_{c2} = k_2 \cdot E_2 \quad (6)$$

El campo eléctrico en la posición 2 es mucho mayor que el campo eléctrico en la posición 1 debido a que el campo eléctrico total observado en la zona 2 se ve incrementado por la acumulación de carga espacial de polaridad opuesta en proximidades cercanas, como se observa en la Figura 4.25.

$$E_2 > E_1 \quad (7)$$

Por tanto se puede establecer una relación entre k_1 y k_2 que corresponden a las conductividades de la zona 1 y 2 respectivamente:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{E_2 \cdot j_{c1}}{E_1 \cdot j_{c2}} \quad (8)$$

Con (3), (7) y (8), se puede establecer la siguiente desigualdad:

$$k_1 \gg k_2 \quad (9)$$

Con lo cual se puede ver que la conductividad en la zona 1 es mucho mayor que la conductividad de la zona 2. Por tanto dos zonas con diferente conductividad existen en la muestra; en otras palabras, la conductividad en la zona donde se desplazan y acumulan paquetes de carga espacial es mayor que la conductividad en las demás zonas de la muestra. Este incremento de la conductividad se explica por la presencia de zonas del dieléctrico con muchos pozos de potencial no muy profundos en los que la liberación/atrapamiento de cargas es muy probable.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

Se puede ver en los ensayos de envejecimiento la evolución del perfil de carga con el modelo tridimensional coloreado, y el máximo valor de campo eléctrico total detectado. Por ejemplo en la Figura 4.29, para la muestra del ensayo de envejecimiento a 20 kV durante las 3 horas, se aprecia muy bien la aparición intermitente de los cúmulos de carga espacial y el campo eléctrico inducido por la carga espacial.

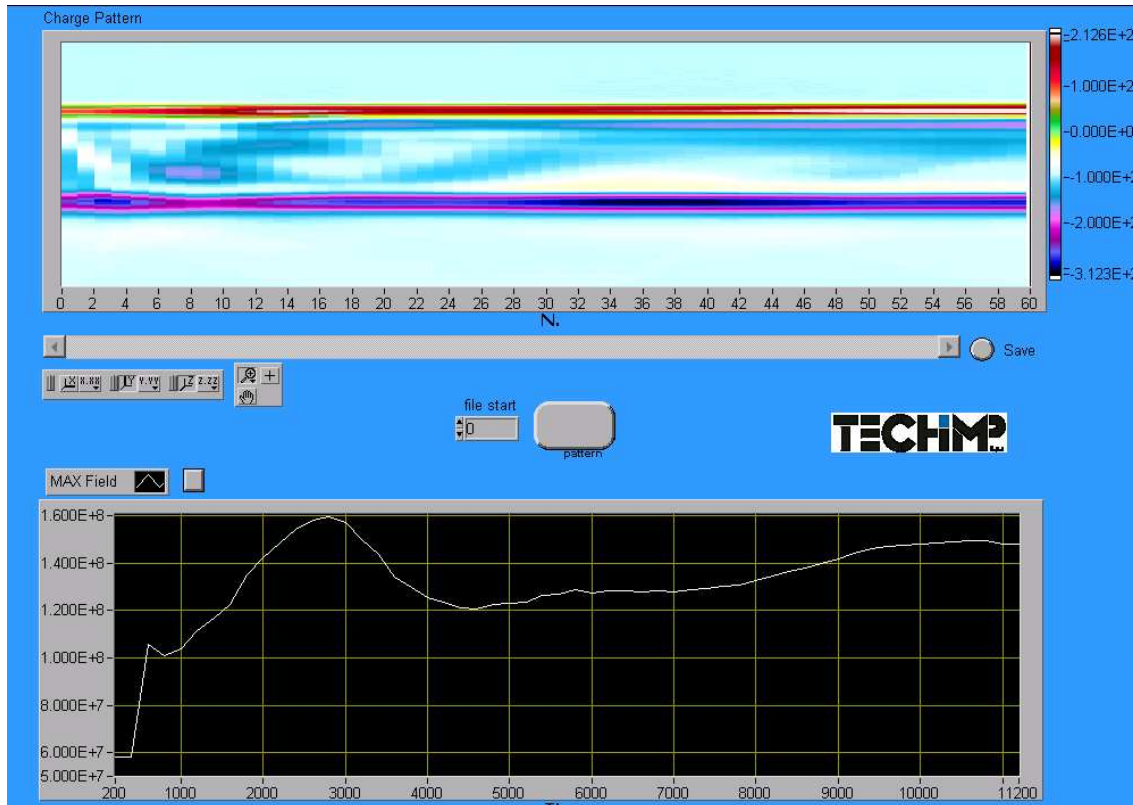


Figura 4.29.- Evolución tridimensional de la carga acumulada (arriba) y del campo eléctrico (abajo), para el ensayo de envejecimiento a 20kV durante 3 horas.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

La Figura 4.30 muestra con mayor detalle los valores de aproximadamente los 100 primeros minutos de envejecimiento a 20 kV durante 3 horas. En los primeros instantes se puede observar el transporte de carga positiva de ánodo a cátodo representado en la Figura 4.20. Posteriormente se puede apreciar el transporte de carga negativa de cátodo a ánodo representado en la Figura 4.21. También se observa cómo ambos electrodos sufren variaciones de carga acumulada cuando se aproximan o se alejan los paquetes de carga que se transportan, este fenómeno se debe a la inyección y la recombinación de la carga de los electrodos.

Este fenómeno es de vital importancia en los materiales aislantes, pues la movilidad de la carga y su acumulación dentro de una aislante incrementan el campo local en el seno de la muestra cuando cargas opuestas se encuentran en proximidades cercanas.

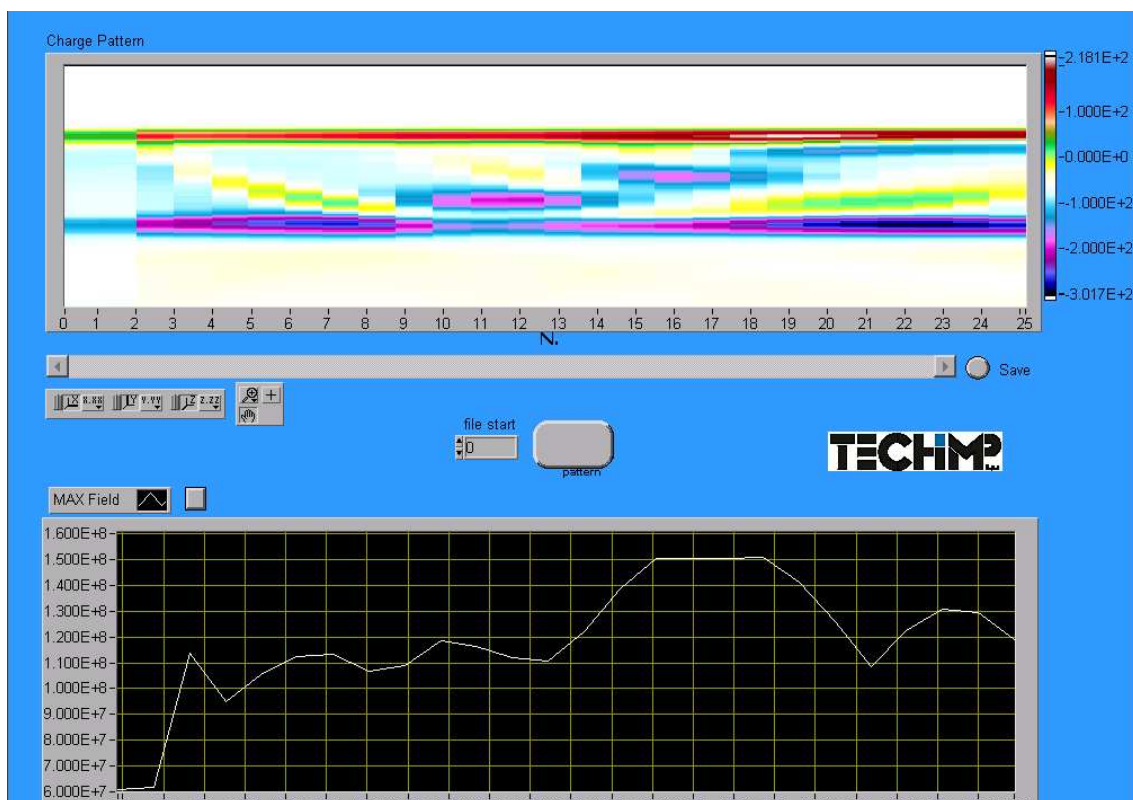


Figura 4.30.- Evolución tridimensional de la carga acumulada (arriba) y del campo eléctrico (abajo), para aproximadamente los 100 primeros minutos del ensayo de envejecimiento a 20kV durante 3 horas.

4.3.- Ensayos con doble muestra.

En estos ensayos se estudia la carga espacial aparece en dos láminas adyacentes de XLPE de 0,15 mm. La finalidad es detectar la evolución de la carga espacial acumulada en las interfaces de las láminas con los electrodos y en la interfaz existente entre las dos láminas de dieléctrico cuando se incrementa paulatinamente la tensión durante el ensayo. Las medidas de carga espacial se harán en primer lugar para 2 láminas de XLPE sanas sin ningún daño causado previamente; posteriormente, se harán con una de las dos láminas dañada previamente bien por colisiones electrónicas o por colisiones iónicas.

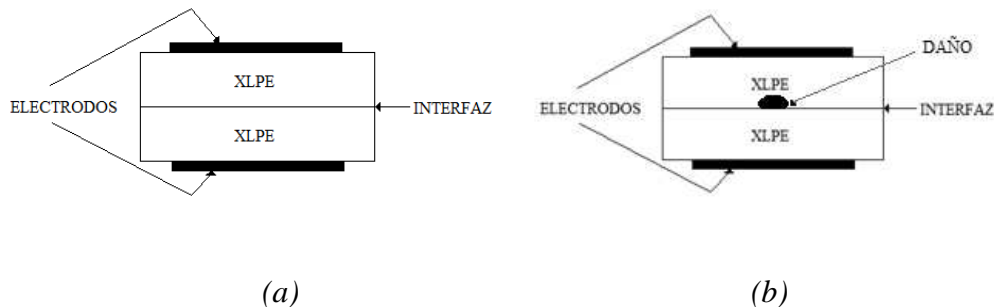


Figura 4.31.- Diagrama esquemático de la estructura de las muestras: (a) dos muestras sanas, (b) muestra dañada sobre muestra sana.

Las muestras de polietileno han sido envejecidas durante varias horas mediante el uso de una geometría punta-plano como la de la Figura 4.32. La alta divergencia de campo eléctrico en torno a la punta provocará la ionización del aire, que dará lugar a la aparición de carga libre que incidirá sobre la muestra (descargas parciales). Las muestras se envejecieron mediante tensiones unipolares pulsantes de forma de onda cuadrada, de manera que con el plano puesto a tierra se tiene ataque de portadores de carga negativa (electrones), mientras que si es la punta, serán portadores de carga positiva (iones). En un trabajo previo se muestra cómo se consiguió una magnitud de carga estadísticamente estable para ambos tipos de envejecimiento ([Martínez-Tarifa, 2009]). El grado de deterioro en las muestras dañadas es función del tiempo de envejecimiento.

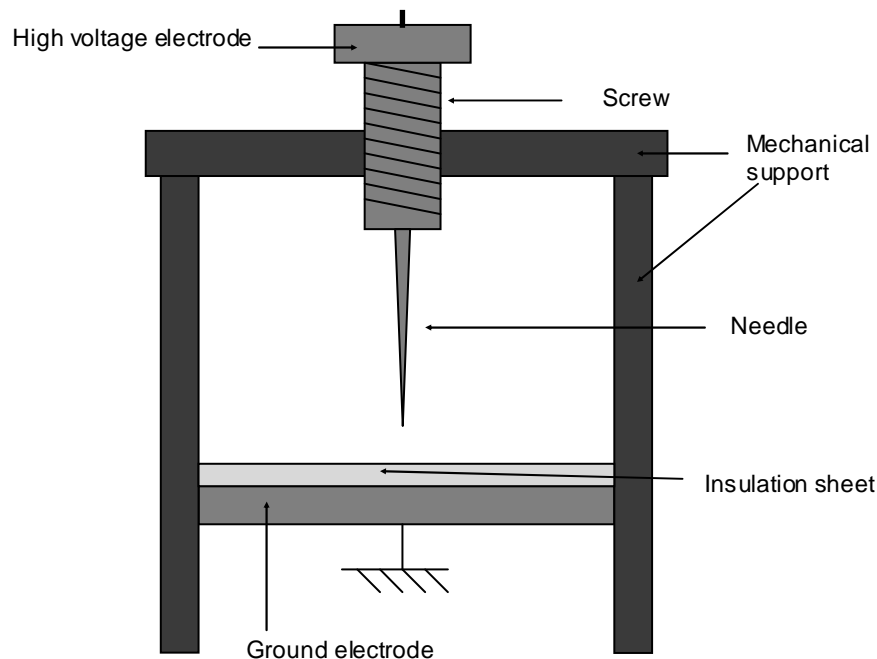


Figura 4.32.- Montaje experimental para erosionar las láminas de XLPE.

Para el caso de muestras dañadas se trata de confirmar que la carga espacial se acumula con mayor facilidad en la zona del daño, se necesita menos nivel de tensión para poder apreciar la carga acumulada, y ésta será mayor cuanto mayor sea el daño en la muestra. El daño o ruptura parcial generada en una de las muestras es un lugar favorable para la aparición y acumulación de carga, pues en la zona del daño las imperfecciones químicas y físicas generadas por las colisiones electrónicas e iónicas son abundantes (enlaces rotos, subproductos generados en la perforación, cavidades de aire, etc).

A continuación se muestran las graficas obtenidas para cada uno de los ensayos realizados, representando la carga en C/m^3 frente a grosor de la muestra, y la evolución de la carga acumulada para distintos niveles de tensión.

4.3.1.- Dos muestras sanas.

La Figura 4.33 muestra la evolución del perfil de carga en dos láminas sin degradación de 0,15 mm cada una, cuando se incrementa la tensión desde 8kV hasta 16 kV.

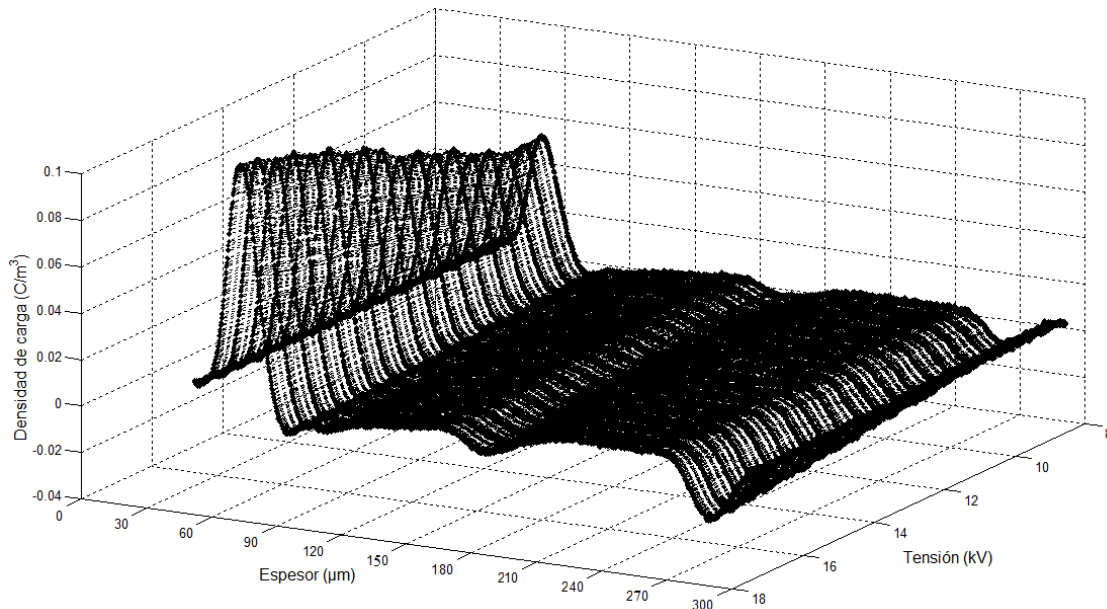


Figura 4.33.- Carga en las 2 láminas sanas.

En la Figura 4.33 se puede observar cómo a medida que aumenta el nivel de tensión aplicada, la carga espacial procedente de la inyección desde los electrodos (homocarga) se incrementa. Esta carga acumulada en los electrodos no aporta información sobre el estado de la muestra. Con objeto de estudiar con mayor precisión el efecto que la tensión tiene sobre la interfaz dieléctrico-dieléctrico, se representa la carga acumulada frente a la tensión aplicada en la Figura 4.34.

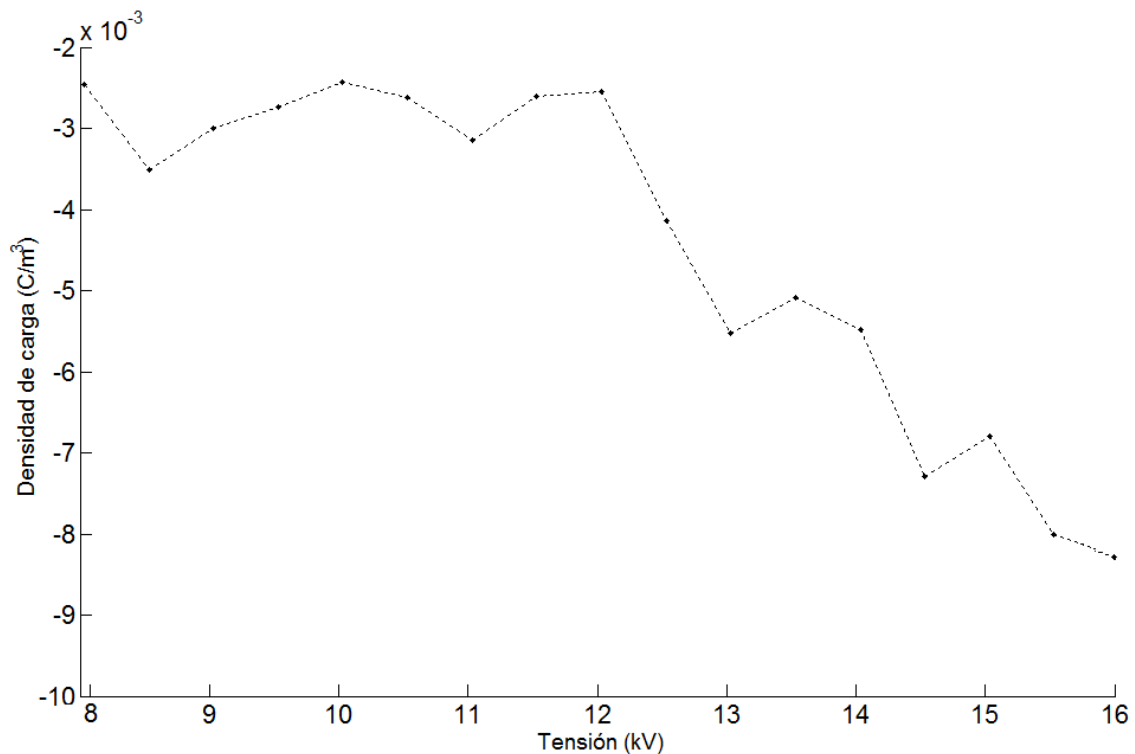


Figura 4.34.- Carga acumulada en el entorno de la interfaz entre las dos láminas sanas.

Según se observa en la Figura 4.34 la carga espacial que aparece en la interfaz dieléctrico-dieléctrico crece cuando la tensión aumenta. Esta carga se debe a la discontinuidad del aire que se encuentra entre los dos dieléctricos; en ella la carga eléctrica se deposita con facilidad, debido a intensificación de campo eléctrico que se produce en un espacio de aire rodeado de dieléctrico sólido de mayor permitividad.

4.3.2.- Muestras con daño causado por electrones.

Una de las dos láminas del ensayo fue degradada con descargas parciales procedentes de ionizaciones punta-plano; la punta fue alimentada con tensiones unipolares negativas, por lo que ésta emitía electrones que atacaban la lámina de XLPE. El grado de degradación de la muestra depende del tiempo de envejecimiento, a mayor tiempo de envejecimiento el nivel de daño será mayor.

1) *Muestra sana sobre muestra dañada 30 minutos.*

La Figura 4.35 muestra la evolución de la carga con el aumento de la tensión en las dos láminas de 0,15 mm cada una, estando una de ellas dañada durante 30 minutos mediante bombardeo electrónico. La tensión se incrementa desde 8 kV hasta 20 kV.

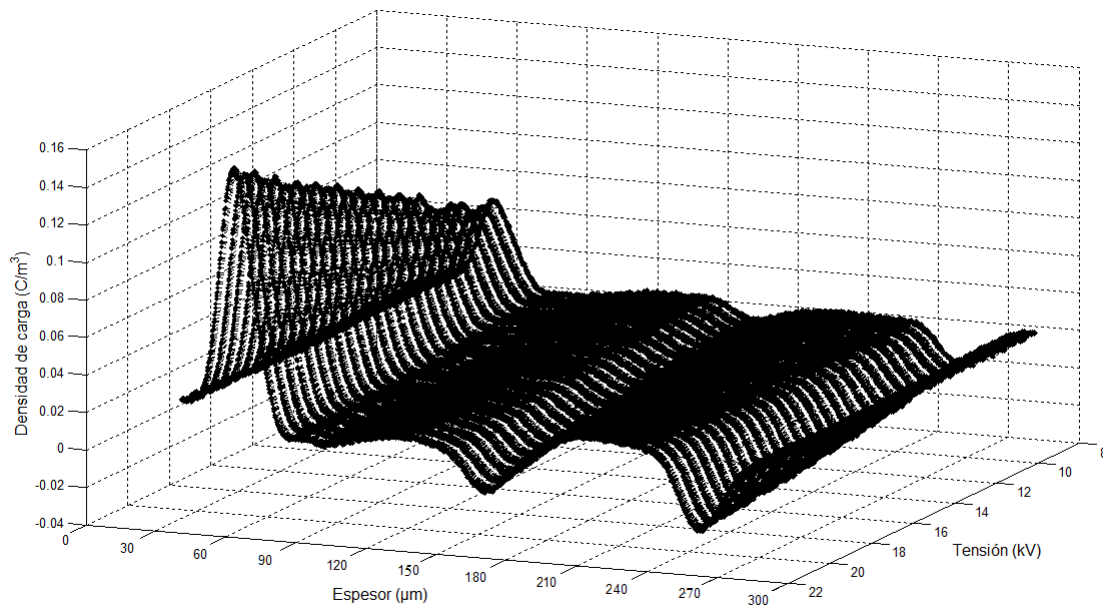


Figura 4.35.- Evolución de la carga en dos láminas (0.3mm) estando una dañada 30 minutos con electrones.

Se observa un incremento superior de la carga en la interfaz dieléctrico-dieléctrico comparándolo con el ensayo con dos láminas sanas (Figura 4.33). El daño de una de las láminas provoca una zona de acumulación de carga con mayor facilidad; el aislante está “roto” en esa zona y la consecuencia es una zona más sensible para acumular carga. Los enlaces rotos del daño, posibles huecos y subproductos químicos debidos al envejecimiento son buenos emplazamientos para la creación y absorción de carga eléctrica acumulable, pues en ellos están presentes imperfecciones químicas y físicas.

En la Figura 4.36 se muestra con mayor detalle que en la Figura 4.35 el incremento de la carga espacial acumulada en la interfaz de los dos dieléctricos cuando uno está dañado previamente durante 30 minutos.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

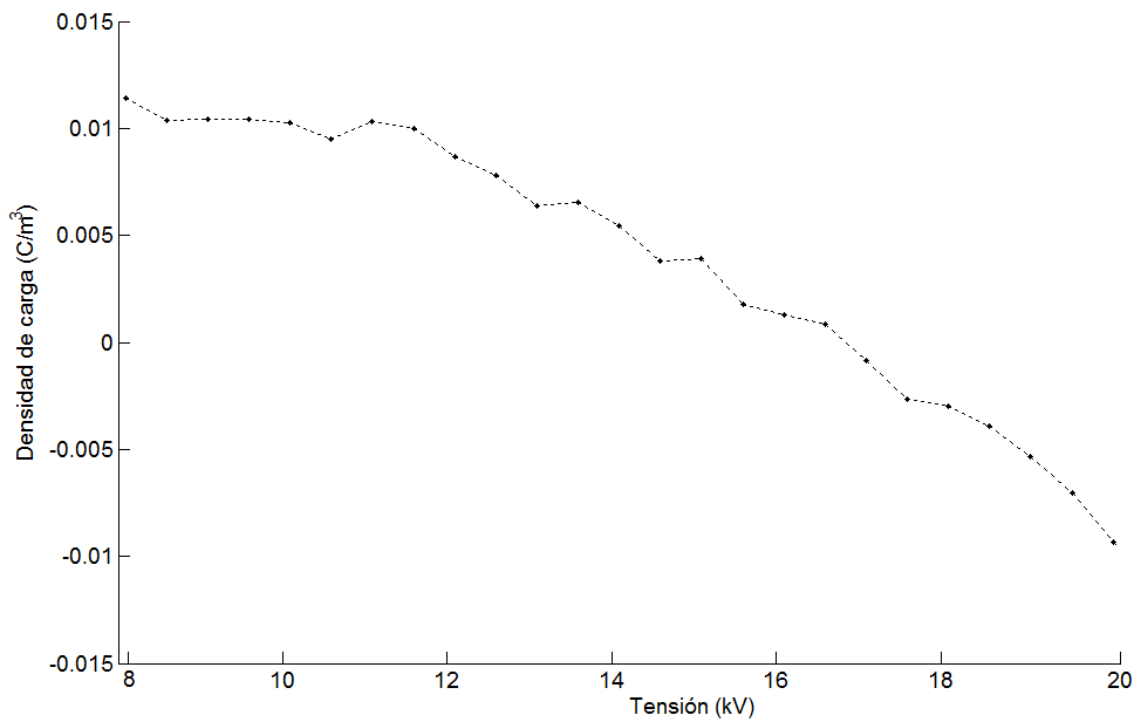


Figura 4.36.- Carga acumulada en el entorno de la interfaz entre las dos láminas estando una de ellas dañada mediante electrones durante 30 minutos.

Se puede observar cómo la carga en la interfaz dieléctrico-dieléctrico se reduce con el aumento de tensión de 8 a 20 kV, desde unos $0,01 \text{ mC/m}^3$ hasta $-0,01 \text{ mC/m}^3$, aproximadamente un incremento de $0,02 \text{ mC/m}^3$ de densidad de carga negativa acumulada en la interfaz.

2) Muestra sana sobre muestra dañada 2h.

La Figura 4.37 muestra la evolución de la carga con el aumento de la tensión en las dos láminas de 0,15 mm cada una, estando una de ellas dañada durante dos horas mediante bombardeo electrónico. La tensión se incrementa desde 8 kV hasta 20 kV.

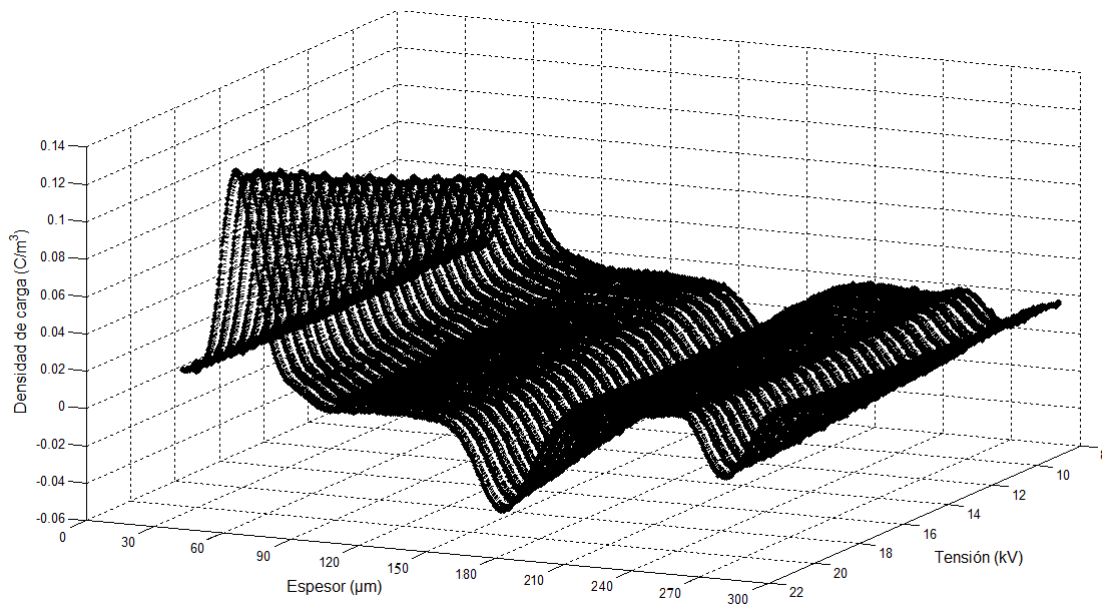


Figura 4.37.- Carga en dos láminas (0.3mm) con una de ellas dañada durante 2 horas mediante bombardeo electrónico.

Se observa un incremento de la carga espacial acumulada en la unión entre láminas con respecto a los casos anteriores. La evolución de la carga acumulada en la interfaz dieléctrico-dieléctrico se muestra en la Figura 4.38.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

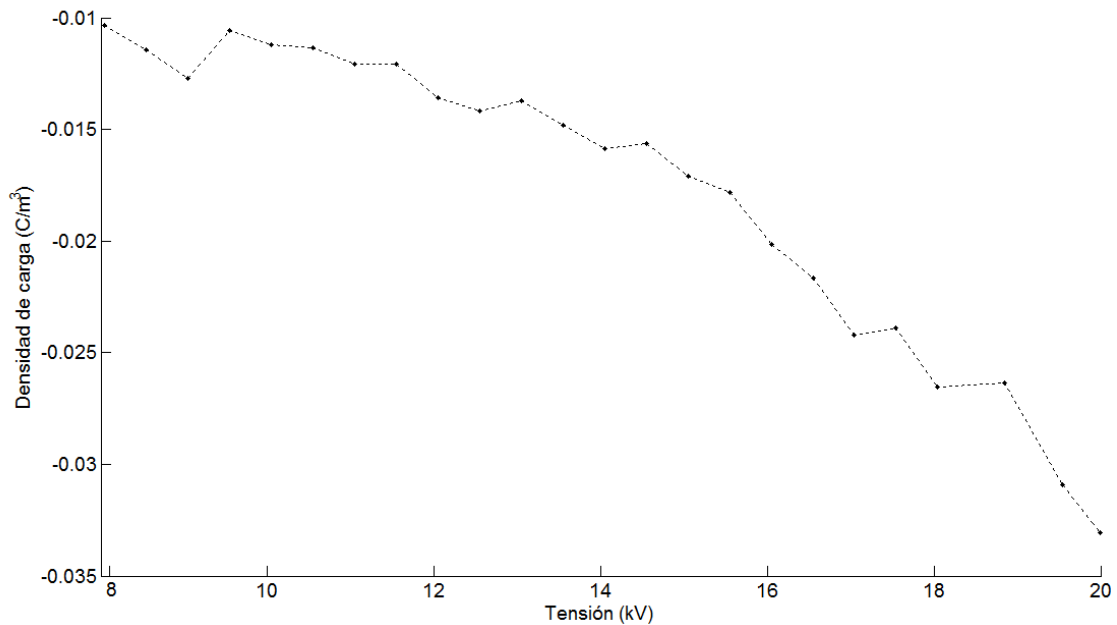


Figura 4.38.- Carga acumulada en el entorno de la interfaz entre las dos láminas estando una de ellas dañada por electrones durante 2 horas.

Se puede observar cómo la carga en la interfaz dieléctrico-dieléctrico se reduce con el aumento de tensión de 8 a 20 kV, desde unos $-0,01 \text{ mC/m}^3$ hasta $-0,33 \text{ mC/m}^3$, aproximadamente un incremento de $0,023 \text{ mC/m}^3$ de densidad de carga negativa acumulada en el medio. Por tanto, la densidad de carga espacial acumulada es mayor cuanto mayor es el daño causado en la muestra.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

3) Muestra sana sobre muestra dañada 4 horas.

La Figura 4.39 muestra la evolución de la carga en las dos láminas, estando una de ellas dañada durante 4 horas mediante bombardeo electrónico. La tensión se incrementa desde 8kV hasta unos 20kV.

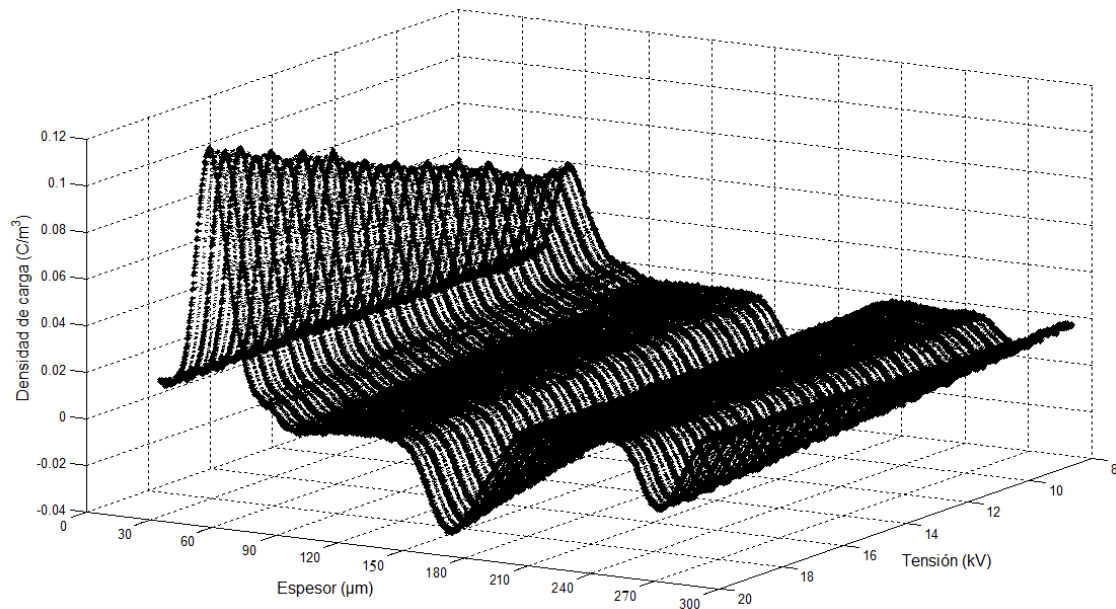


Figura 4.39.- Carga en dos láminas (0.3mm) con una de ellas dañada durante 4 horas mediante bombardeo electrónico.

La evolución de la carga acumulada en la interfaz dieléctrico-dieléctrico se muestra en la Figura 4.40.

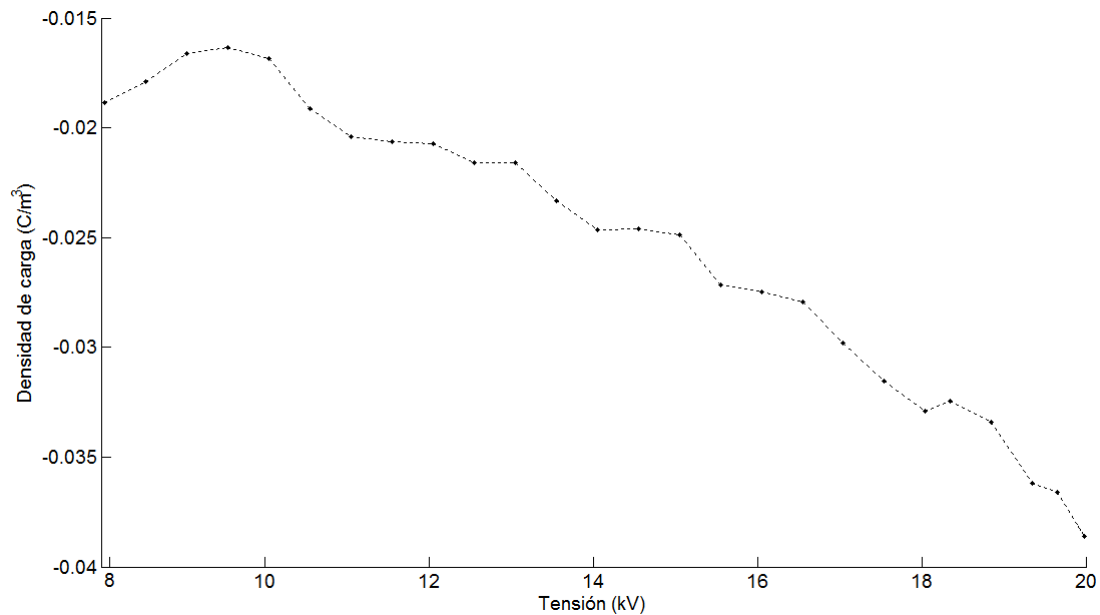


Figura 4.40.- Carga acumulada en el entorno de la interfaz entre las dos láminas estando una de ellas dañada por electrones durante 4 horas.

En la Figura 4.40 se puede ver como la carga en la interfaz dieléctrico-dieléctrico se reduce con el aumento de tensión de 8 kV a 20 kV, desde unos $-0,015 \text{ mC/m}^3$ hasta $-0,04 \text{ mC/m}^3$, aproximadamente un total de $0,025 \text{ mC/m}^3$ de incremento de densidad de carga negativa acumulada en el medio.

El máximo valor de carga alcanzable en este caso en la interfaz dieléctrico-dieléctrico es de $-0,04 \text{ mC/m}^3$ y sucede a una tensión aproximada de 20kV; comparando con el ensayo anterior a la misma tensión (Figura 4.38), el máximo valor de carga alcanzable es de $-0,033 \text{ mC/m}^3$.

Un análisis cuantitativo de los datos obtenidos permite asegurar que el valor de carga acumulada en la unión lámina-lámina aumenta a medida que la muestra ha sido sometida a mayor tiempo de degradación. A modo de resumen de la información aportada, en la tabla 4.1 se observan dos valores de densidad de carga acumulada en la interfaz de las dos láminas para los diferentes ensayos con las muestras dañadas por electrones: el valor del incremento de la densidad de carga y el máximo valor alcanzable de densidad de carga para 20 kV en la interfaz dieléctrico-dieléctrico.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

Tiempo de envejecimiento (h)	0.5	2	4
Incremento de la densidad de carga acumulada en la interfaz (mC/m^3), entre 8 y 20 kV.	0,020	0,023	0,025
Carga máxima registrada en la interfaz (mC/m^3) a tensión 20 kV.	-0,010	-0,033	-0,040

Tabla 4.1.- Valores de carga en los ensayos con las muestras dañadas por electrones.

4.3.3.- Muestras con daño causado por iones.

Las láminas fueron degradadas con descargas parciales procedentes de ionizaciones en una geometría punta-plano en la que el plano fue alimentado por tensiones negativas, por lo que iones positivos eran atraídos hacia la lámina de XLPE. Al igual que anteriormente, el grado de degradación depende del tiempo de envejecimiento. Los ensayos se realizan con láminas de 0,15 mm de espesor y la tensión en todos los ensayos se incrementa desde 8 kV hasta 20 kV.

1) Muestra sana sobre muestra dañada 30 minutos.

La Figura 4.41 muestra la evolución de la carga con el aumento de la tensión en las dos láminas estando una de ellas dañada durante 30 minutos mediante bombardeo iónico.

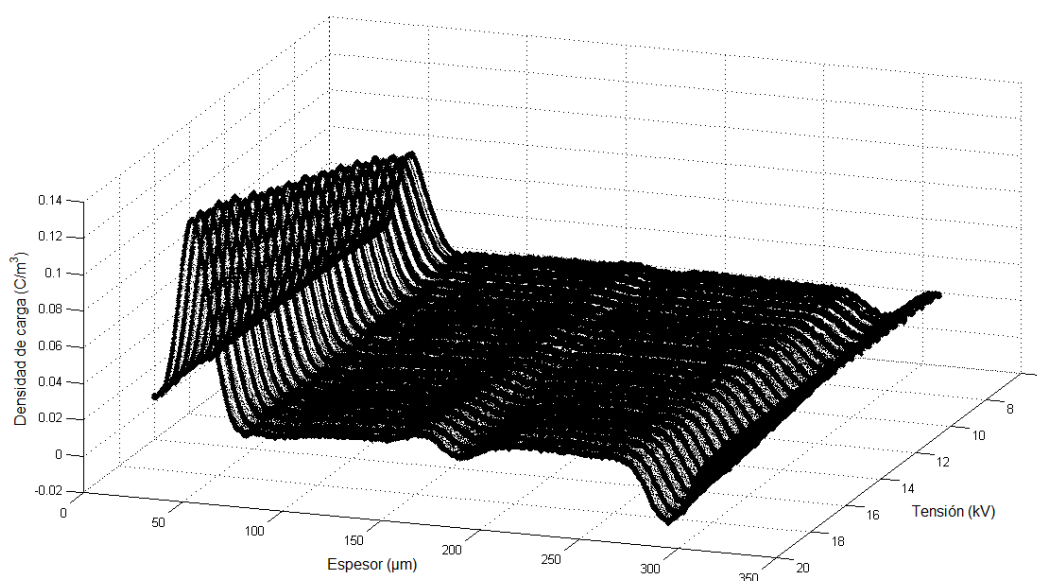


Figura 4.41.- Carga en dos láminas (0.3mm) con una de ellas dañada durante 30 minutos mediante bombardeo iónico.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

La evolución de la carga que se puede observar en el entorno de la interfaz dieléctrico-dieléctrico, es decir a unos 0,15mm de un electrodo, se muestra en la Figura 4.42.

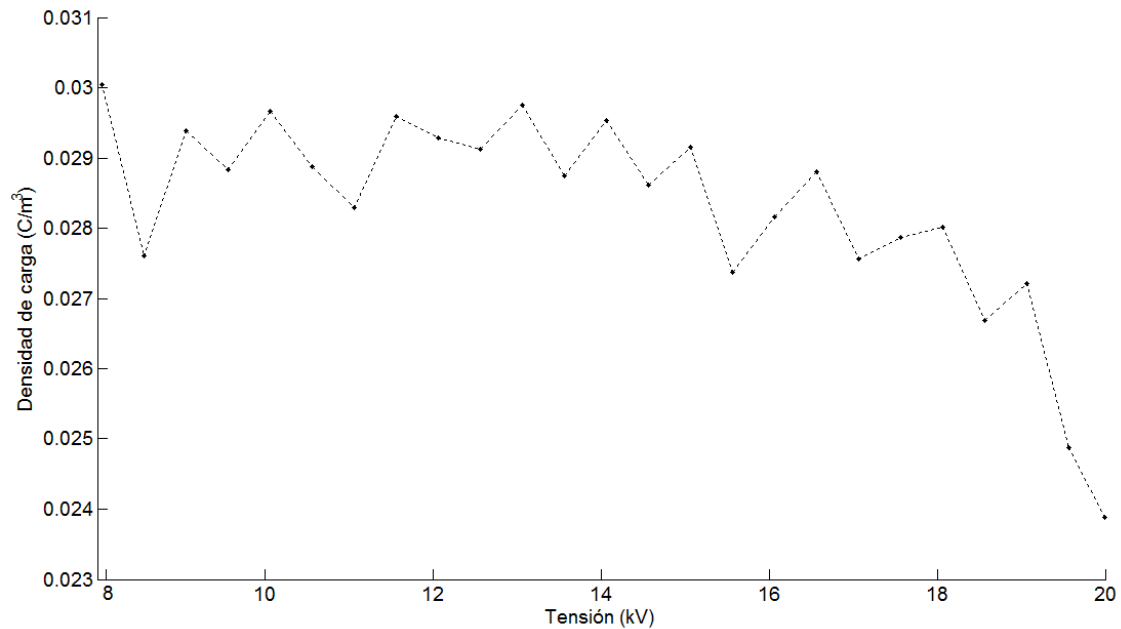


Figura 4.42.- Carga acumulada en el entorno de la interfaz entre las dos láminas estando una de ellas dañada por iones durante 30 minutos.

Se puede observar cómo la carga en la interfaz dieléctrico-dieléctrico se reduce con el aumento de la tensión de 8 kV a 20 kV, desde unos 0,03 mC/m³ hasta 0,024 mC/m³, un incremento de 0,006 mC/m³ de densidad de carga negativa acumulada en el medio.

La evolución es muy irregular porque las variaciones son muy pequeñas para este nivel de envejecimiento del aislante.

2) Muestra sana sobre muestra dañada 2h.

La Figura 4.43 muestra la evolución de la carga con el aumento de la tensión en las dos láminas estando una de ellas dañada durante 2 horas por iones.

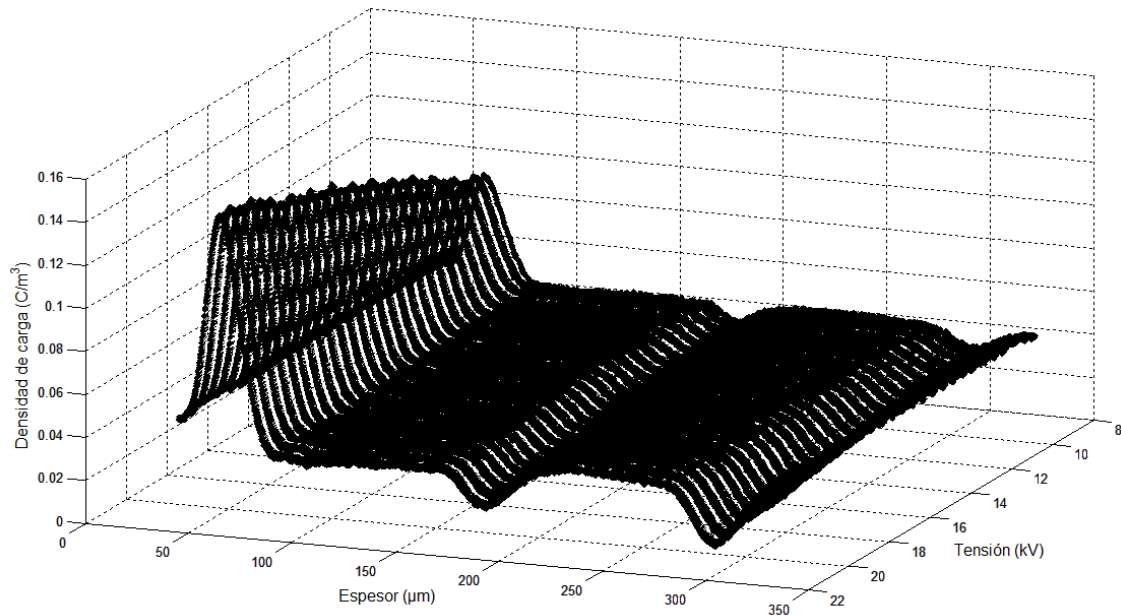


Figura 4.43.- Carga en dos láminas (0.3mm) con una de ellas dañada durante 2 horas mediante bombardeo iónico.

Comparando las figuras 4.41 y 4.43, es notable el incremento que se observa en la carga que se acumula en la interfaz dieléctrico-dieléctrico cuando la muestra está más envejecida. La evolución de la carga acumulada en la interfaz dieléctrico-dieléctrico se muestra en la Figura 4.44.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

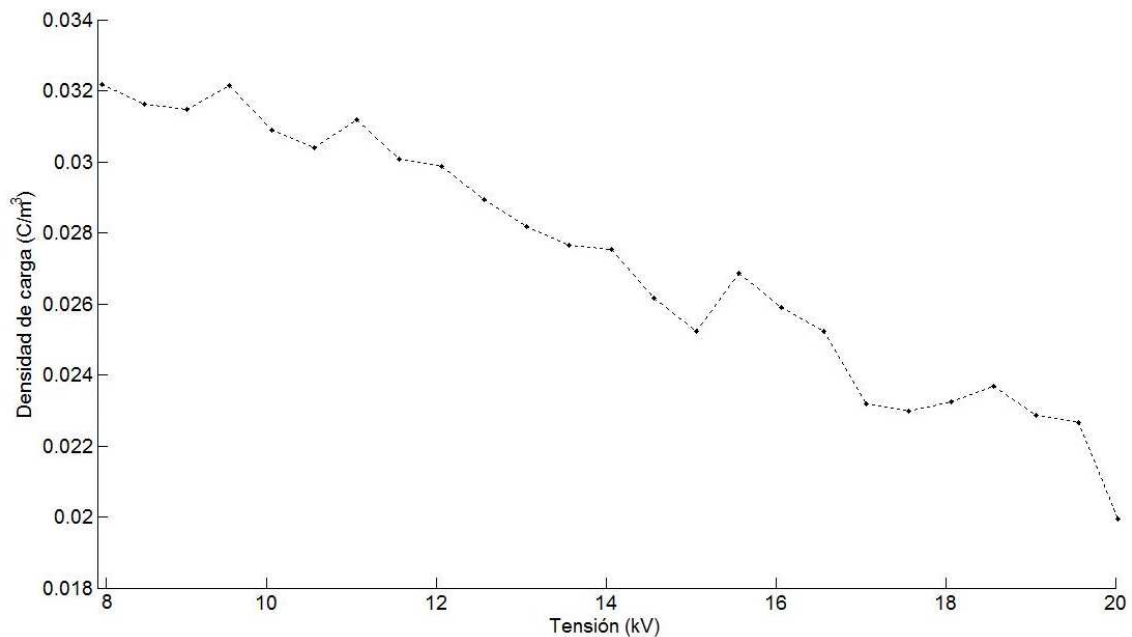


Figura 4.44.- Carga acumulada en el entorno de la interfaz entre las dos láminas estando una de ellas dañada por iones durante 2 horas.

Se puede observar cómo la carga en la interfaz dieléctrico-dieléctrico se reduce con el aumento de tensión de 8 kV a 20 kV, desde unos $0,032 \text{ mC/m}^3$ hasta $0,02 \text{ mC/m}^3$, eso supone un incremento de $0,012 \text{ mC/m}^3$ de densidad de carga negativa acumulada en el medio (el doble que en el caso anterior con la lámina dañada 30 minutos, ver Figura 4.42).

3) *Muestra sana sobre muestra dañada 4 horas:*

La Figura 4.45 muestra la evolución de la carga con el aumento de la tensión en las dos láminas estando una de ellas dañada durante 4 horas por iones.

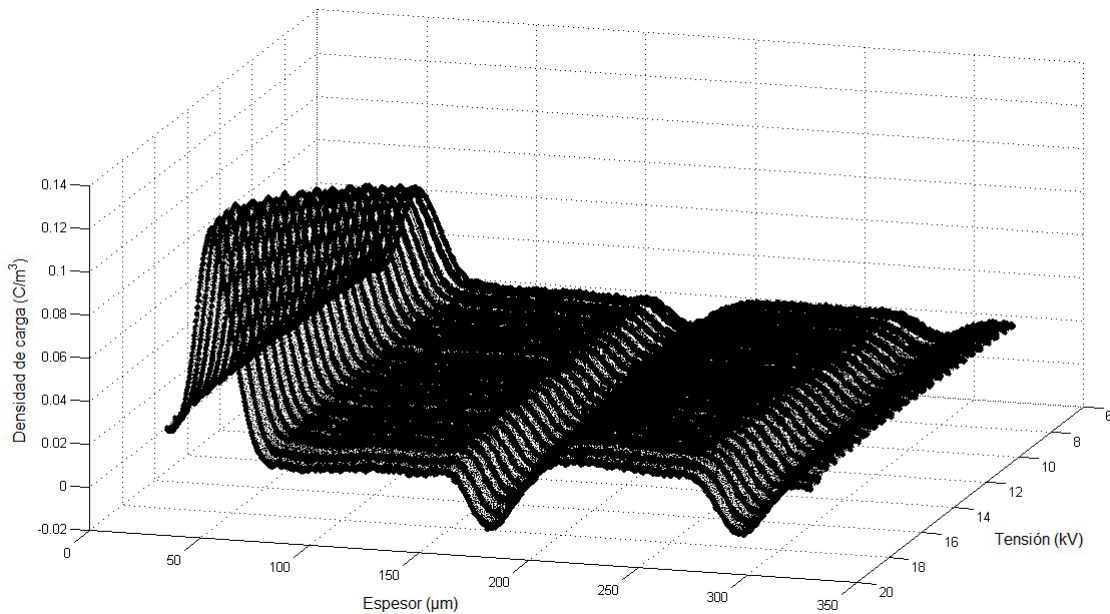


Figura 4.45.- Carga en dos láminas (0.3mm) con una de ellas dañada durante 4 horas mediante bombardeo iónico.

Si se comparan las figuras 4.41, 4.43 y 4.45 se confirma la misma tendencia de la carga acumulada en la interfaz dieléctrico-dieléctrico conforme el nivel de daño en la muestra aumenta. La evolución de la carga acumulada en la interfaz dieléctrico-dieléctrico se muestra en la Figura 4.46.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

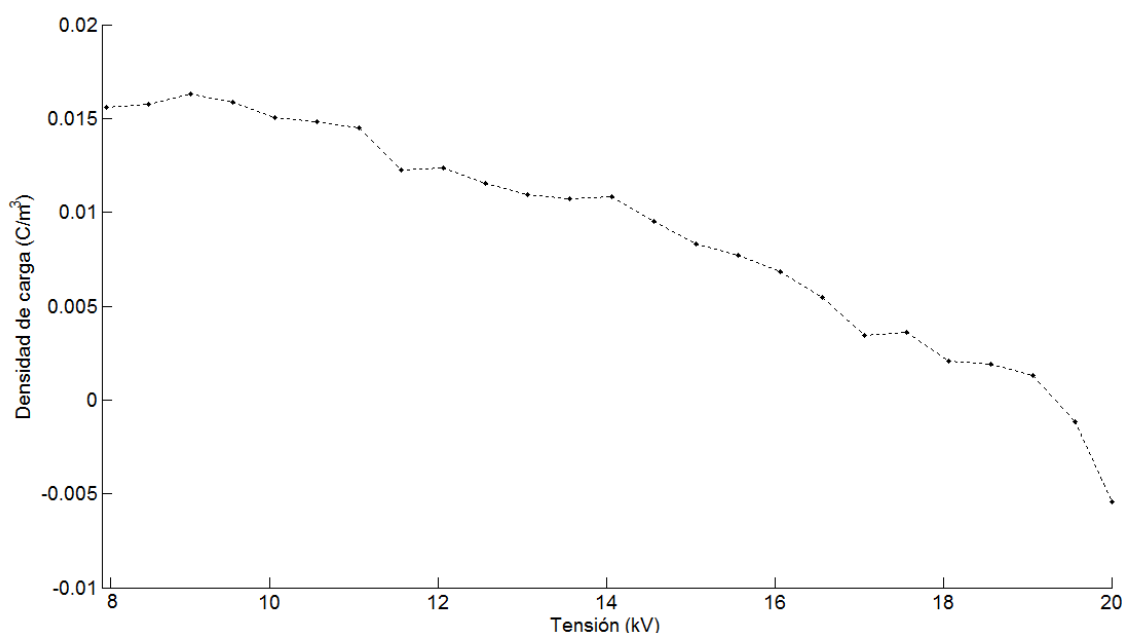


Figura 4.46.- Carga acumulada en el entorno de la interfaz entre las dos láminas estando una de ellas dañada por iones durante 4 horas.

Se puede observar cómo la carga en la interfaz dieléctrico-dieléctrico se reduce desde unos $0,015 \text{ mC/m}^3$ hasta $-0,005 \text{ mC/m}^3$, eso supone un incremento de $0,02 \text{ mC/m}^3$ de densidad de carga negativa acumulada en el medio.

La evolución de la carga espacial acumulada para el caso de las muestras dañadas por iones sigue la misma tendencia que la que siguen las muestras dañadas por electrones: a medida que aumenta el grado de degradación en las muestras, aumenta también el nivel de carga acumulado en éstas. En la siguiente tabla se observan los incrementos de densidad de carga de carga (de 8kV a 20kV) para los diferentes ensayos con muestras dañadas por iones, y el valor máximo de carga alcanzable a los 20 kV de tensión.

Tiempo de envejecimiento (h)	0.5	2	4
Incremento de la densidad de carga acumulada en la interfaz (mC/m^3), entre 8 y 20 kV.	0,006	0,012	0,020
Carga máxima registrada en la interfaz (mC/m^3) a tensión 20 kV.	0,024	0,020	-0,005

Tabla 4.2.- Valores de carga en los ensayos con las muestras dañadas por iones.

4.3.4.- Comentarios.

Se ha comprobado que para los ensayos con doble muestra, el nivel de carga espacial acumulada es proporcional a la tensión aplicada, es decir, cuando aumenta la tensión aumenta el nivel de carga en los electrodos y también en la interfaz dieléctrico-dieléctrico. El aumento de la carga observado en los electrodos conforme la tensión aplicada aumenta es típico de la acumulación inducida por la tensión aplicada (homocarga); el límite para el crecimiento de esta carga será el de la tensión de ruptura del aislante ([Chen, 2004]).

Para observar con mayor detalle este fenómeno la Figura 4.47 muestra el aumento de la carga espacial acumulada en uno de los electrodos para el ensayo de muestra sana sobre muestra dañada 4 horas por electrones. La carga espacial aumenta de forma prácticamente lineal con respecto al aumento de la tensión aplicada.

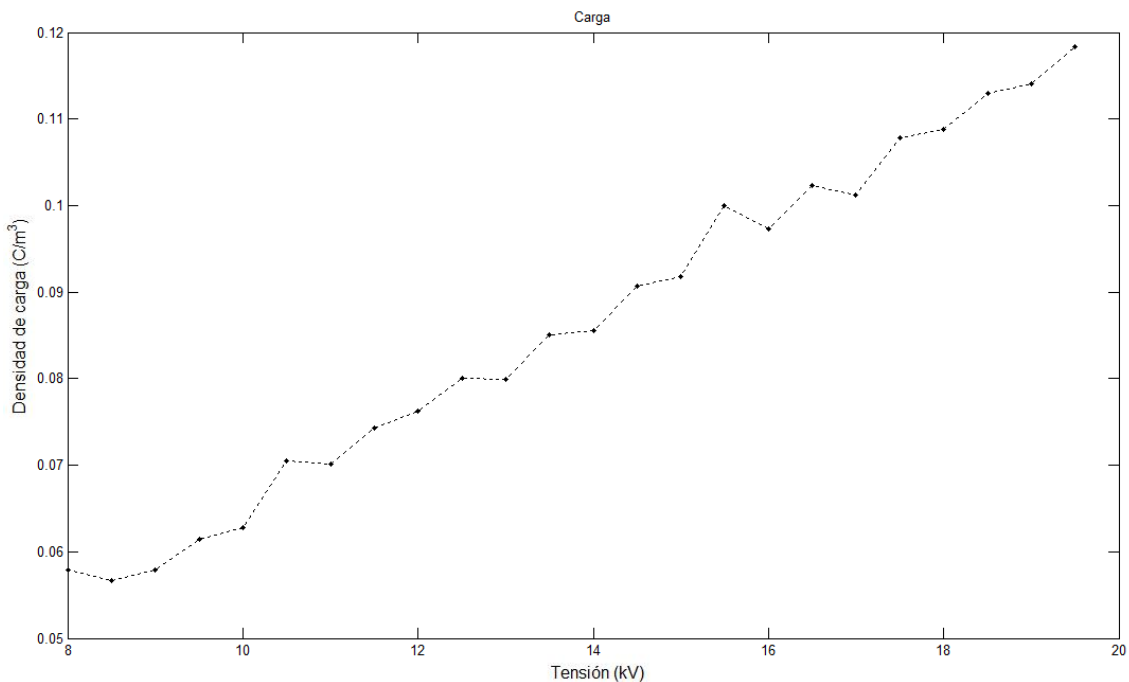


Figura 4.47.- Evolución de la carga acumulada con respecto a la tensión en el electrodo positivo en el ensayo con la muestra dañada 4 horas por electrones.

En todos los ensayos en la interfaz dieléctrico-dieléctrico la carga acumulada siempre tiene polaridad negativa: eso supone que este medio actúa como trampa para portadores de carga negativa (electrones), pero no para portadores positivos. Se acumula mayor nivel de carga cuando en la interfaz dieléctrico-dieléctrico existe una degradación eléctrica del aislamiento. A medida que el daño en el aislamiento es de mayor gravedad (mayor tiempo de envejecimiento), la acumulación de carga en esa zona es mayor. Las cargas libres (que puedan aparecer como consecuencia de las rupturas de enlaces

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

producidas en el envejecimiento) aparecen con mayor facilidad conforme la tensión aplicada sea mayor, liberándose de los pozos de potencial en que se encuentran.

También es inevitable la aparición de cavidades microscópicas en la interfaz bien causadas por el acoplamiento entre las dos láminas (imposibilidad de una unión compacta sin cavidades de aire), el propio envejecimiento, y otras imperfecciones como rasguños superficiales; todas ellas pueden propiciar la aparición de factores favorables para la aparición de carga espacial (incluso descargas parciales a ciertas tensiones). Para evitar las descargas parciales y disminuir la aparición de carga espacial el tamaño de estas cavidades debe ser lo más pequeño posible ([Chen, 2004]). Si la muestra tiene un daño causado, bien por electrones o iones, el tamaño de las cavidades que pueden aparecer será superior.

La Figura 4.48 muestra el perfil de carga para diferentes niveles de tensión en un ensayo con dos muestras sanas de polietileno de baja densidad ("Low density Polyethylene", LDPE) realizado en un documento de la bibliografía ([Chen, 2004]) obteniendo los mismos resultados que los observados en el análisis experimental, es decir, aumento de la carga espacial acumulada en electrodos e interfaz dieléctrico-dieléctrico (negativa) con el aumento de tensión.

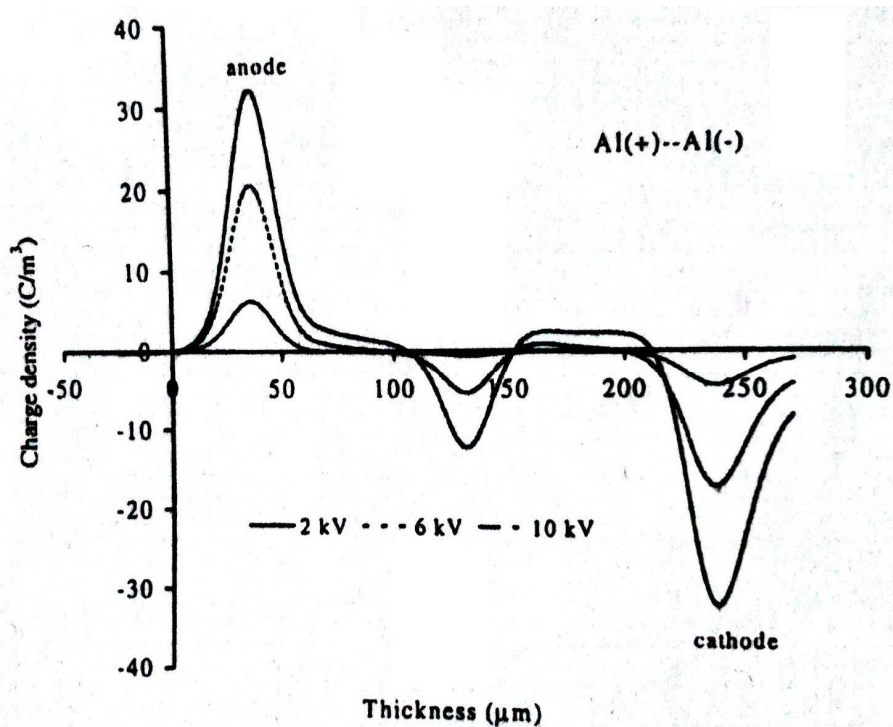


Figura 4.48.- Evolución de la carga en dos muestras de LDPE sanas para tres niveles de tensión ([Chen, 2004]).

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

Los daños causados por electrones son más favorables para generar cúmulos de carga espacial pues en los ensayos descritos la carga que se acumula en las laminas dañadas mediante electrones con un determinado tiempo de envejecimiento, es siempre superior que la carga que se acumula en la muestra con el mismo tiempo de envejecimiento causado por iones. En la siguiente tabla se exponen los valores de incremento de densidad de carga para todos los casos comparando los datos de las tablas anteriores para confirmar la hipótesis.

Daño causado previamente.	Electrones			Iones		
Tiempo de envejecimiento (h)	0.5	2	4	0.5	2	4
Incremento de la densidad de carga acumulada en la interfaz (mC/m ³), entre 8 y 20 kV.	0,020	0,023	0,025	0,006	0,012	0,020

Tabla 4.3.- Comparación de carga acumulada para los diferentes ensayos.

La mayor capacidad de acumular carga parece estar relacionada con los daños que provoca el bombardeo electrónico en la estructura del polímero, es decir, las rupturas de los enlaces son emplazamientos privilegiados para la acumulación de carga espacial. El daño causado por las colisiones de electrones en las láminas es superior al daño causado por las de los iones porque la energía cinética ($\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$) de los electrones que chocan con la lámina es superior a la de los iones. A pesar de que la masa de un ión es muy superior a la de un electrón, en un electrón la velocidad, para igualdad de campo eléctrico, es muy superior a la del ión, ya que su movilidad (μ) es más grande, ($\vec{v} = \mu \cdot \vec{E}$). Por el contrario, los iones han sido relacionados con el ataque químico de los polímeros ([Mayoux, 1976]).

También es interesante observar en los perfiles de todos los ensayos que muestran la evolución de la carga en el entorno de la interfaz dieléctrico-dieléctrico, cómo a partir de los 12 kV de tensión la carga comienza a incrementarse con mayor rapidez a medida aumenta la tensión. A ese nivel de tensión la liberación de portadores desde pozos de potencial es más probable.

En la Figura 4.49 se puede ver la evolución del valor de campo eléctrico máximo detectado en el ensayo de la sección 4.3.1 con las dos muestras sanas, junto con el modelo tridimensional coloreado que representa la evolución de la carga. Se puede observar, cuando se intensifica la tensión aplicada, el aumento de: la carga en los electrodos y en la interfaz de las muestras, y del máximo valor de campo eléctrico detectado.

4. Ejemplos de medidas de carga espacial mediante la técnica PEA.

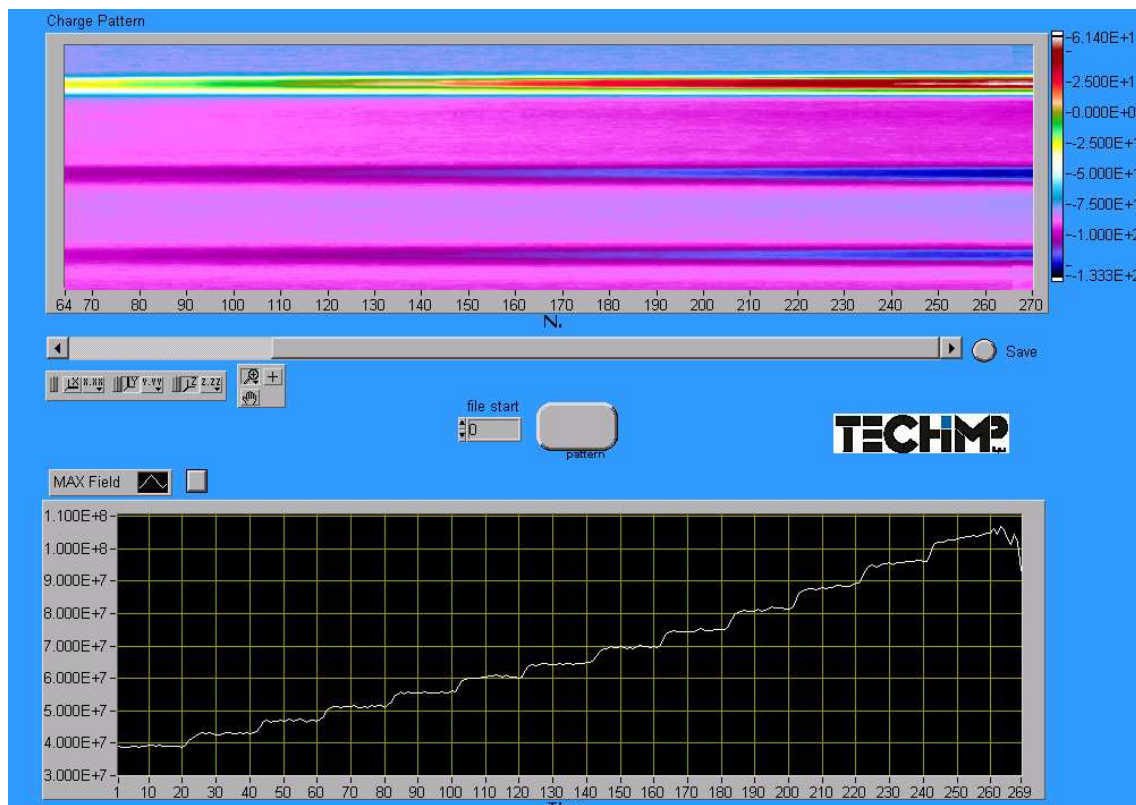


Figura 4.49.- Evolución tridimensional de la carga acumulada (arriba) y del campo eléctrico (abajo), para el ensayo con las dos muestras sanas.

Capítulo 5.- Conclusiones y líneas de trabajo futuro.

El objetivo de este trabajo ha sido mostrar el fenómeno de la carga espacial, comprender las causas de su aparición y observar su comportamiento. Cabe recordar que la carga espacial es un factor degradante para los materiales aislantes que puede impulsar la aparición de otros factores que también son adversos para los aislantes como las descargas parciales, la ruptura dieléctrica, etc. En este trabajo se ha explicado este fenómeno, identificando distintos tipos de carga acumulada que pueden aparecer con el fenómeno físico que las produce.

Se han revisado las principales técnicas de detección de carga espacial, comparando sus principales ventajas e inconvenientes. Con mayor profundidad se ha explicado el proceso de medición mediante pulso electroacústico, cuyo resultado son medidas rápidas, precisas, y no destructivas para el material en ensayo que proporcionan información necesaria para representar la carga espacial que puede aparecer en el aislante.

En este trabajo se han hecho medidas básicas sobre muestras de XLPE de 0.15mm de espesor de la marca *Borealis*. El trabajo ha permitido conocer zonas propensas a acumular carga espacial como son las interfaces de los aislantes con los electrodos, las interfaces entre capas de aislamiento, y zonas de alta conductividad en el interior de un aislante. También se han estudiado las magnitudes de campo eléctrico para los cuales existe mayor probabilidad de aparición de carga en el interior del aislante: en los resultados experimentales de envejecimiento se observa que a partir de 18 kV aplicados (es decir, un campo eléctrico de 120 kV/mm) comienzan aparecer cúmulos de carga espacial en el interior de la muestra. Se puede definir este valor de campo eléctrico como un valor umbral de aparición de carga espacial en el interior del material aislante estudiado. También se ha visto cómo se distribuye la carga del material aislante en función de su polaridad, las consecuencias de invertir la polaridad de la tensión, y el proceso de la inyección de carga desde los electrodos.

En el estudio de la carga espacial en dos capas de aislamiento permite observar en la interfaz de dos láminas acumulación de carga siempre de polaridad negativa, eso supone que la interfaz entre dos láminas actúa como trampa de carga para electrones, pero no para portadores de carga positiva. Este fenómeno ha sido contemplado en los resultados experimentales y es interesante tenerlo en cuenta pues por ejemplo en los aislamientos de un cable eléctrico puede suceder el mismo fenómeno. También se han realizado diversos ensayos que demuestran que al existir un daño en un aislante (provocado por descargas parciales), la carga espacial se acumula con mayor facilidad en la zona del daño, y a medida que el nivel de daño es mayor, mayor es también la cantidad de carga acumulada. Por tanto, la acumulación de carga en un ensayo PEA puede ser relacionada con el envejecimiento prematuro de la muestra aislante.

5. Conclusiones y líneas de trabajo futuro.

Este trabajo pretende ser una aproximación útil al fenómeno de la carga espacial para personal técnico y científico que quiera realizar análisis de muestras aislantes mediante esta técnica. Para ello, se ha elaborado la formulación teórica de la técnica PEA y un pequeño manual práctico sobre el uso del equipo PEA de TECHIMP SYSTEMS S.r.l. disponible en el laboratorio LINEALT de la Universidad Carlos III de Madrid, que puede ser base para futuros trabajos.

Este trabajo permitirá servir de referencia para futuras aplicaciones en que se trate de caracterizar materiales aislantes en función de su capacidad de almacenar carga eléctrica. Como próximos trabajos a realizar, se propone:

- 1) Realizar medidas tras tratamiento térmico previo. Es conveniente eliminar humedad e impurezas sometiendo a las muestras a temperaturas altas (60° - 80°) durante más de 80h ([Mazzanti, 2003]).
- 2) Medidas de degradación de descargas parciales en superficies de muestras comerciales de LDPE, HDPE y XLPE mediante análisis de acumulación de carga en la interfaz de las muestras.
- 3) Caracterización de nuevos materiales dieléctricos sintetizados con aditivos adecuados para acumular menos carga, tener un umbral de campo inferior y eliminar con mayor rapidez la carga acumulada durante el proceso de despolarización.

Capítulo 6.- Referencias Bibliográficas.

[Alquié, 1999] Alquié C.; “Evolution of Space Charge Measurements: New Approaches to Physical Problems”; IEEE 10^o International Symposium on Electrets, pp. 11-17; 1999.

[Bartinkas, 1979] Bartnikas, McMahon, “Engineering Dielectrics: Volume I, Corona Measurement and Interpretation”, ASTM; 1979.

[Cavallini, 2006] Cavallini A. y Montanari G.C.; “Effect of Supply Voltage Frequency on Testing of Insulation System”; IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 13, n^o1, pp. 111-112; 2006.

[Chen, 2004] Chen G., Tanaka Y., Tanaka T. y Zhong L.; “Effect of Polyethylene Interface on Space Charge Formation”; IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, n^o1, pp. 113-116; 2004.

[Chen, 2006] Chen G., Chong Y. L. y Fu M.; “Calibration of the Pulsed Electroacoustic Technique in the Presence of Trapped Charge”; Measurement Science and Technology, 17 (7). pp. 1974-1980; 2006.

[Díaz-Gautier, 2002] José Ramón Díaz Gautier; “Caracterización de Defectos en Sistemas de Aislamiento Mediante la Detección de Descargas Parciales”; Proyecto Fin de Carrera de Ingeniería Industrial, Universidad Carlos III de Madrid, <http://hdl.handle.net/10016/624>; 2002.

[Fleming, 1998] Fleming R. J.; “Space Charge in Polymers, Particularly Polyethylene”; http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-97331999000200010&script=sci_arttext&tlng=en; pp. 12-20; 1998.

[Fothergill, 2004] Fothergill J., “Electrical Ageing of Dielectrics”, IEEE International Conference on Solid Dielectrics; 2004.

[**Gallot-lavallée, 2000**] Gallot-lavallée O. y Christian L.; “Mesure des Charges d’espace par la Méthode Électro-acoustique Pulsée”; pp. 1-29; 2000.

[**Khalifa, 1990**] Khalifa M., “High Voltage Engineering. Theory and Practice”, Marcel Dekker; 1990.

[**LINEALT, 2008**] Laboratorio Alta Tensión Universidad Carlos III de Madrid; “Instrucción Técnica para el Ensayo de Carga Espacial con el Sistema PEA FS de TECHIMP”; pp. 1-28; 2008.

[**Matsui, 2005**] Matsui K., Tanaka Y., Takada T., Fukao T., Fukunaga K., Maeno T. y Alison J. M.; “Space Charge Behavior in Low-density Polyethylene at Pre-breakdown”; IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 12, pp. 406-414; 2005.

[**Martínez-Tarifa, 2009**] Martínez-Tarifa J.M., Cavallini A., Montanari G.C., Dissado L.A.; “Surface degradation on XLPE under PD activity”; Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; Virginia Beach (U.S.A.) 2009.

[**Mayoux, 1976**] Mayoux C.; “Partial Discharge Phenomena and the Effect of their Constituents on Polyethylene”; IEEE Transactions on Electrical Insulation; Vol. EI-11, n°4; 1976.

[**Mazzanti, 2003**] Mazzanti G., Montanari G.C., Palmieri F.; “Quantities extracted from Space-Charge Measurements as Markers for Insulation Aging”; IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation; pp 198-203; 2003.

[**Morshuis, 2005**] Morshuis P.; “Degradation of Solid Dielectrics due to internal partial discharge: Some thoughts on progress made and where to go now”; IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 12, n°5; 2005.

[**Maeno,1988**] Maeno T., Futami T., Kushibe H., Takada T. y Cooke C. M.; “Measurement of Spatial Charge Distribution in Thick Dielectrics Using the Pulsed Electroacoustic Method”; IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 23, nº3; pp.433; 1988.

[**Sanden, 1997**] Sanden B.; “Space Charge Accumulation in Fresh and Degassed XLPE Insulation”; Dielectric Society Meeting; pp. 225-231; 1997.

[**Shackleford, 1998**] Shackleford J.F., “Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros”, Prentice Hall, 1998.

[**Takada, 1999**] Takada T.; “Acoustic and Optical Methods for Measuring Charge Distributions in Dielectrics”; Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; pp. 1-8; 1999.

[**Teyssedre, 2004**] Gallota-lavallée O. y Teyssedre G.; “Space Charge Measurement in Solid Dielectrics by the Pulsed Electro-acoustic Technique”; International Conference on Solid Dielectrics; Toulouse (France), 2004.

